

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Ing.

PAR
MICHEL MICHAUD.

MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION UNIFIÉE PIÈCE-OUTILLAGE
EN CAO AÉRONAUTIQUE : APPLICATION AUX TÔLES
ET GABARITS DE DÉCOUPE

MONTRÉAL, LE 12 AOÛT 2004

© droits réservés de Michel Michaud

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Roland Maranzana, ing., Dr., directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

M. Louis Rivest, ing., Ph.D., codirecteur
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

M. Jean-François Châtelain, ing., Ph.D., président du jury
Département de génie mécanique
École de technologie supérieure

M. Benoit Côté, ing., M.Sc.A., Conseiller technique senior
Centre de compétences PLM
Bombardier aéronautique, Ville Saint-Laurent

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 9 JUILLET 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION UNIFIÉE PIÈCE-OUTILLAGE EN CAO AÉRONAUTIQUE : APPLICATION AUX TÔLES ET GABARITS DE DÉCOUPE

Michel Michaud

SOMMAIRE

Les outils de CAO en fin de carrière, tel que CATIA V4, ne permettent généralement pas de maintenir les relations technologiques entre les différents modèles et entités requis pour décrire l'ensemble d'un produit et des processus qui lui sont associés, tel que le modèle géométrique d'une pièce et ceux de son outillage, ce qui limite sérieusement les possibilités de propagation automatique des changements.

L'émergence d'une nouvelle génération de logiciels de CAO, à laquelle appartient CATIA V5, permet d'envisager la mise en œuvre de liens technologiques non seulement au sein du modèle produit, mais aussi entre le modèle d'une pièce et les modèles relatifs à son processus de production, tel que l'outillage.

Ce mémoire démontre qu'une préparation adéquate des modèles de pièces à l'aide d'une méthodologie tirant partie de l'approche métier, du typage des entités et des liens technologiques permet un gain de temps appréciable lors de la propagation des modifications, depuis la pièce jusqu'à l'outillage associé. Une analyse comparative entre CATIA V4 et CATIA V5 pour la modélisation des tôles de revêtement d'aéronefs et des gabarits de découpe employés pour la préparation de leur usinage révèle que l'effort supplémentaire consenti lors de la création des modèles avec liens technologiques est rapidement récupéré lors des modifications subséquentes.

AERONAUTICAL CAD UNIFIED MODELLING METHODOLOGY FOR PARTS AND TOOLING: APPLICATION TO SKIN PANELS AND TEMPLATES

Michel Michaud

ABSTRACT

End of career CAD tools, such as CATIA V4, generally do not maintain the technological links between the different models and entities describing the group formed by a product and its associated processes, such as the geometric model of a part and its Tooling, thus preventing Automatic Change Propagation.

The New Generation of CAD Software, to which CATIA V5 belongs, allows the prediction of the usage of Technological Links, not only in the Product Model, but also between the Part Model and the models associated to its Production process, such as Tooling.

This thesis demonstrate that an adequate preparation of Part models, with a methodology that take advantage of Trade Oriented application, strong Typifying of entities and Technological Links provide an important Time Saving when modifications are propagated from the part to its Tooling. A comparative analysis between CATIA V4 and CATIA V5 for the modelling of aeronautical skin panels and their associated chemical milling preparation templates shows that the supplementary efforts invested in the creation of a model using Technological Links are shortly paying back when modifications occurs.

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier mes codirecteurs, les professeurs Roland Maranzana et Louis Rivest, qui ont encadré et guidé mon projet tout au long de ce travail d'application. Au cours de ces années, ils m'ont orienté et stimulé en me faisant profiter de leur savoir et de leur point de vue.

Mes remerciements s'adressent aussi à Bombardier Aéronautique et à Pratt & Whitney Canada, ainsi qu'à leur personnel, qui m'ont accueilli à l'été 2003 (Bombardier) et à l'été 2004 (PWC). Merci de m'avoir accordé du temps et d'avoir mis diverses ressources à ma disposition.

Je tiens également à remercier mes collègues de travail Bruno Lamarche et Omar Msaaf, dont les idées et les connaissances ont permis de faire avancer certaines parties de ce projet.

De plus, une partie de ce projet de maîtrise aurait été plus difficile à réaliser sans l'appui des dirigeants de l'École nationale d'aérotechnique qui ont facilité l'organisation des mes horaires de travail pour la poursuite des différentes activités, sans oublier les personnes m'ayant aidé lors de la révision et la mise en page de ce document.

Finalement, j'aimerais remercier ma compagne, Céline, qui m'a accompagné tout au long de cette démarche. Son aide, ses encouragements, sa patience et sa tolérance furent énormément appréciés.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LA CONCEPTION D'OUTILLAGE EN AÉRONAUTIQUE.....	3
1.1 La conception de l'outillage associé à une pièce	3
1.2 Les tôles de revêtement	4
1.3 L'usinage chimique des tôles.....	9
1.4 L'outillage aéronautique.....	11
1.5 Les gabarits de découpe	16
1.6 La CAO en conception unifiée	18
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE DE LA CONCEPTION UNIFIÉE PIÈCE-OUTILLAGE.....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Étude de cas : La production des tôles de revêtement	24
2.2.1 Méthodologie de modélisation actuelle	25
2.2.1.1 Modélisation de la pièce	25
2.2.1.1.1 Pièce sujette au contexte.....	25
2.2.1.1.2 Pièce indépendante du contexte.....	27
2.2.1.2 Modélisation du gabarit de découpe	28
2.3 L'émergence d'une nouvelle génération d'outils de CAO.....	29
2.4 Synthèse et objectifs de recherche	30
CHAPITRE 3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	32
3.1 L'approche par caractéristiques en recherche	32
3.2 L'approche par caractéristiques dans les logiciels de CAO.....	36
3.3 La conception d'outillage	37
3.4 La conception unifiée.....	40
3.5 Approche proposée par l'équipe du LIPPS	41
3.5.1 L'approche orientée métier	41
3.5.2 Le typage fort des entités	41

3.5.3	Les liens technologiques	42
3.5.4	L'empreinte et la pseudo-empreinte.....	42
3.5.5	Exemples de réalisations.....	42
3.6	Fonctionnalités de la nouvelle génération d'outils de CAO	44
3.6.1	Liens intra et inter-modèles	45
3.6.2	Publication.....	47
3.7	Synthèse	47
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION UNIFIÉE DES TÔLES ET DES GABARITS DE DÉCOUPE	50
4.1	Mise en situation.....	50
4.2	Conditions de départ	51
4.3	Approches de modélisation	57
4.3.1	Soustraction	57
4.3.2	Laminage.....	58
4.3.3	Épaississement	59
4.4	Application des approches pour la tôle de revêtement.....	60
4.4.1	Modélisation avec liens technologiques éphémères	60
4.4.2	Modélisation avec liens technologiques persistants.....	62
4.5	Application des approches pour le gabarit de découpe.....	66
4.5.1	Modélisation avec liens technologiques éphémères	66
4.5.2	Modélisation avec liens technologiques persistants.....	66
4.6	Étude de cas de modifications	69
4.6.1	Pièce à poche unique complexe	70
4.6.2	Tôle de revêtement à simple courbure.....	72
CHAPITRE 5	LES RÉSULTATS ET LEUR ANALYSE	76
5.1	Résultats de la modélisation.....	76
5.2	Analyse des résultats de modélisation.....	83
5.2.1	Remarques relatives à CATIA V4	84
5.2.2	Remarques relatives à CATIA V5	85
5.3	Résultats de modifications avec CATIA V5.....	93
5.4	Analyse des résultats des modifications	94
5.5	Généralisation à partir des résultats	95
CHAPITRE 6	PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS.....	97
6.1	Perspectives d'automatisation de la méthode de modélisation des outillages.....	97
6.1.1	Exploitation des caractéristiques de la pièce	97
6.1.2	Exploitation de la définition de l'un des solides utilisé dans l'approche par laminage.....	99

	Page
6.2 Extension des résultats à d'autres domaines d'application	101
6.3 Autre cas d'application.....	102
CONCLUSION.....	104
ANNEXE 1 : Publication d'éléments pour le positionnement isostatique de pales de turbine	107
BIBLIOGRAPHIE.....	117

LISTE DES TABLEAUX

	Page
TABLEAU I	Caractéristiques des assemblages 78
TABLEAU II	Spécifications des systèmes informatiques employés..... 78
TABLEAU III	Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5 Modèles des pièces à traiter par usinage chimique 80
TABLEAU IV	Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5 Modèles des gabarits de découpe 81
TABLEAU V	Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5 Ensemble des pièces et des gabarits de découpe 82
TABLEAU VI	Entités géométriques gérées et stockées dans les modèles de pièces..... 91
TABLEAU VII	Temps de modification des fichiers..... 94

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Trois techniques de production de tôles avec poches..... 5
Figure 2	Tôles avec poches d'épaisseur uniforme..... 6
Figure 3	Pièce à poche unique complexe 6
Figure 4	Tôle à poche à profondeurs multiples 7
Figure 5	Tôle à poche avec îlot..... 7
Figure 6	Gabarits pour poches à profondeur uniforme..... 8
Figure 7	Gabarit pour poches à profondeurs multiples 9
Figure 8	Attaque chimique décorative..... 10
Figure 9	Calibre de profondeur..... 12
Figure 10	Gabarit de montage..... 13
Figure 11	Outillage de découpe..... 13
Figure 12	Poinçon-matrice manuel 14
Figure 13	Chariot..... 14
Figure 14	Gabarit de perçage..... 15
Figure 15	Outillage de support de cellule..... 15
Figure 16	Support d'outillage modulaire 16
Figure 17	Pièce usinée chimiquement et gabarit de découpe..... 17
Figure 18	Découpe de revêtement protecteur..... 17
Figure 19	Liens technologiques lors de la conception de pièce et d'outillage 23
Figure 20	Exemples d'assemblages 26
Figure 21	Décalage géodésique et euclidien 27
Figure 22	Décalage entre gabarit et tôle..... 28
Figure 23	Exemple de pièce et de gabarit 29
Figure 24	Conversion de caractéristiques..... 34
Figure 25	Exemple de paramètres..... 46
Figure 26	Décalage lisse – tôle 53
Figure 27	Courbes d'intersections structure – surface de référence - IML 54
Figure 28	Courbes de référence pour découpe 55

Figure 29	Courbes de découpe	55
Figure 30	Modélisation par soustraction	57
Figure 31	Modélisation par laminage	58
Figure 32	Modélisation par épaissement	59
Figure 33	Configuration de points	63
Figure 34	Ordre d'identification des contours	64
Figure 35	Tôle et gabarit de découpe avant modification	70
Figure 36	Esquisse – avant et après	71
Figure 37	Tôle de revêtement – avant et après	71
Figure 38	Gabarit de découpe – avant et après	72
Figure 39	Assemblage tôle-structure et assemblage tôle- gabarit de découpe avant modification	73
Figure 40	Modification apportée à l'assemblage tôle-structure	73
Figure 41	Assemblage tôle-structure – avant et après modification	74
Figure 42	Assemblage tôle-gabarit de découpe – avant et après modification	74
Figure 43	Tôle de revêtement et gabarit de découpe après mise à jour	75
Figure 44	Pièces modélisées	77
Figure 45	Distorsion de décalage	85
Figure 46	Boîte de dialogue pour courbes parallèles	86
Figure 47	Options multiples lors de la création de congés	87
Figure 48	Alternatives de découpe	88
Figure 49	Boîte de dialogue pour découpe – <i>Split</i>	88
Figure 50	Problématique de la production des congés	89
Figure 51	Boîte de dialogue pour les points faits sur courbe	90
Figure 52	Modélisation du gabarit par caractéristiques	98
Figure 53	Surface de départ pour outillage	100
Figure 54	Approche par modification	101
Figure 55	Gabarit de découpe pour toupillage	102

INTRODUCTION

L'usage de logiciels de conception pour la création de maquettes numériques est aujourd'hui incontournable dans l'industrie aéronautique. Cependant, à cause des possibilités limitées des logiciels traditionnellement employés, les approches de modélisation appliquées au domaine de l'outillage ne permettent pas de produire un concept unifié pièce-outillage, c'est-à-dire un concept où la modélisation de la pièce est basée sur une structure stricte et adéquate du produit de manière à ce que les informations ainsi formatées puissent être efficacement exploitées lors de la conception et la modélisation de l'outillage associé afin de faciliter la propagation automatique des changements.

Les logiciels de CAO employés aujourd'hui par l'entreprise aéronautique sont encore en grande partie des logiciels basant leur méthodologie de travail sur l'usage de liens éphémères entre les différents éléments géométriques et les fichiers. Par exemple, à l'intérieur d'un modèle de pièce, des liens éphémères sont créés entre des entités lorsqu'une droite est créée parallèlement à une autre. Une fois la seconde droite créée, la notion de parallélisme n'existe plus entre les entités. Plus tard, un nouveau modèle est créé pour faire la conception de l'outillage; des entités sont recopiées à partir du modèle de la pièce, créant encore ainsi une série de liens éphémères. En général, les outils de CAO encore employés en grande partie par l'industrie aéronautique, tel CATIA V4, utilisent peu les mécanismes nécessaires à créer des liens persistants, ce qui limite les possibilités de propagation automatique de changements à travers des fichiers différents. Toute modification est donc faite principalement de façon manuelle et séquentielle, augmentant ainsi les délais et les risques d'incohérences et d'erreurs.

L'arrivée d'une nouvelle génération de logiciels de CAO laisse entrevoir des possibilités très intéressantes pour palier à ce problème : une conception orientée métier, un typage approprié des éléments pertinents et l'établissement de liens technologiques intra et inter-modèles seront une partie de la solution. De plus, l'introduction de ces nouveaux outils permet de questionner la manière dont ils seront employés : les anciennes méthodologies doivent-elles être conservées ou transposées? Ne devrait-on

pas plutôt adapter les pratiques courantes pour exploiter avantageusement les outils proposés? On verra qu'une méthodologie de modélisation appropriée permettra de préparer adéquatement le modèle d'une pièce pour permettre son usage dans une approche de conception intégrée pièce-outillage.

Le projet présenté dans ce mémoire utilise, comme cas d'application, le domaine des tôles employées comme revêtement pour les avions. Ces tôles sont traitées chimiquement de manière à en éroder une certaine partie et ainsi en diminuer le poids. La préparation des tôles pour le procédé d'usinage chimique demande l'emploi de gabarits de découpe dont la géométrie est liée à la géométrie des tôles. Si un changement survient dans la structure de l'appareil, non seulement les éléments structuraux seront affectés, mais aussi les tôles de revêtement et l'outillage qui sert à leur préparation.

Dans la première partie de ce mémoire, la conception de l'outillage en aéronautique est présentée pour illustrer la diversité de ce domaine d'application. La problématique de la modélisation unifiée des pièces et de leur outillage est ensuite présentée. Une revue bibliographique suit pour présenter les travaux de recherche pertinents à notre problématique avant d'aborder le chapitre traitant de la solution méthodologique préconisée. Ce dernier est suivi des résultats obtenus, de leur analyse et des perspectives et conclusions à en tirer.

CHAPITRE 1

LA CONCEPTION D'OUTILLAGE EN AÉRONAUTIQUE

1.1 La conception de l'outillage associé à une pièce

La conception d'outillage pour la fabrication et l'assemblage de pièces mécaniques constitue une discipline propre en soi. Elle considère le type de pièce à fabriquer, les procédés employés pour sa fabrication, le matériau de la pièce, les tolérances, ainsi que de nombreuses autres contraintes.

À partir de la géométrie des objets à produire, le concepteur d'outillage doit prévoir des moyens de support, des dispositifs de positionnement de pièce, des mécanismes d'ajustement ou encore des systèmes de localisation d'outillage qui permettront la fabrication selon les tolérances requises. Dans certains cas, il doit définir des outillages ou des portions d'outillage qui épousent parfaitement la forme de la pièce à fabriquer afin de faciliter sa rétention ou son positionnement. Les outillages doivent parfois permettre à la pièce d'épouser certaines formes une fois la pièce fabriquée, lorsque des aspects d'élasticité sont en jeu.

De plus, le concepteur d'outillage doit, le plus souvent possible, utiliser des éléments standards, qu'ils soient de type quincaillerie (vis, boulons, écrous, rondelles, etc.) ou de type modulaire (plaques perforées, tés de positionnement, etc.), pour réduire le coût de l'outillage en évitant la fabrication de pièces spéciales. Il se doit de donner à la solution le plus de possibilités d'évolution, puisqu'une pièce évoluera à quelques reprises au cours de son cycle de vie, période s'échelonnant sur plusieurs dizaines d'années dans le secteur de l'aéronautique.

L'outillage aéronautique amène des difficultés supplémentaires à cause des formes complexes devant être produites pour répondre aux contraintes aérodynamiques, des calculs élastiques supplémentaires liés à l'usage de matériaux composites ou encore de la taille des pièces devant être fabriquées ou assemblées.

1.2 Les tôles de revêtement

Un stage effectué chez Bombardier aéronautique à l'été 2003 [1] a permis de recueillir un bon nombre d'informations liées au domaine des tôles de revêtement.

Pour produire ces tôles de revêtement à diverses épaisseurs, trois procédés peuvent être employés. D'abord, dans certains cas, la tôle est faite d'un regroupement de tôles usinées d'épaisseurs variables, collées à l'aide de liant à base d'époxy. Une pièce peut aussi être fabriquée par usinage intégral de manière à offrir les épaisseurs requises sans avoir à procéder à des assemblages impliquant de nombreuses pièces ou un temps de fabrication élevé. Finalement, dans le cas qui nous intéresse, c'est-à-dire celui de l'usinage chimique, la tôle à fabriquer est produite à partir d'une pièce de métal en feuille ayant l'épaisseur maximale requise qui, après avoir été masquée adéquatement, est trempée dans une solution acide permettant d'attaquer la surface et d'amincir la région exposée. La forme et le type de matériau de la pièce devant être traitée influencent le temps de trempage. La figure 1 illustre les trois techniques employées pour la production de poches.

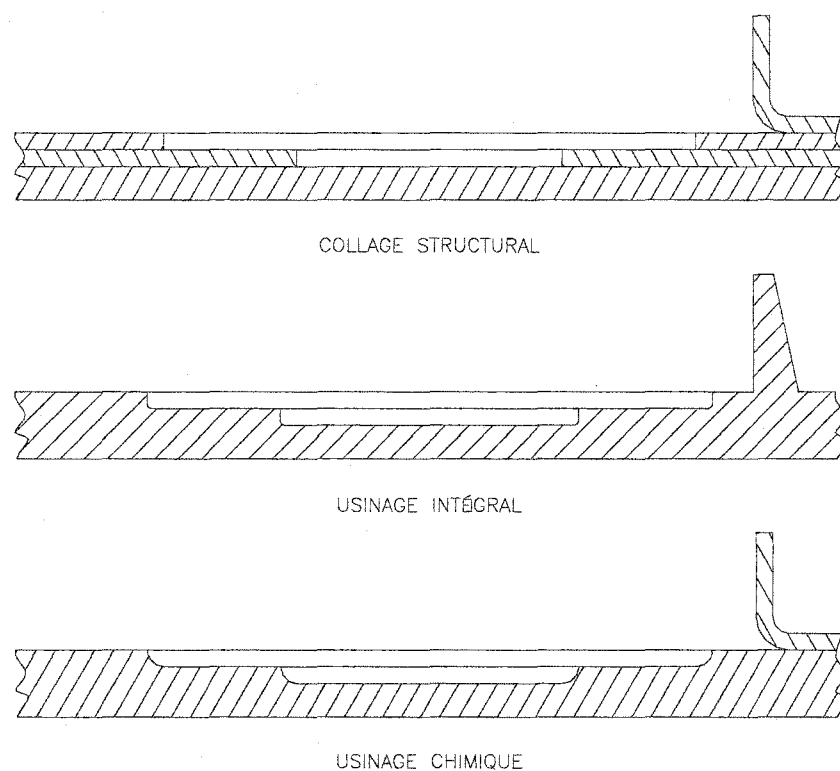
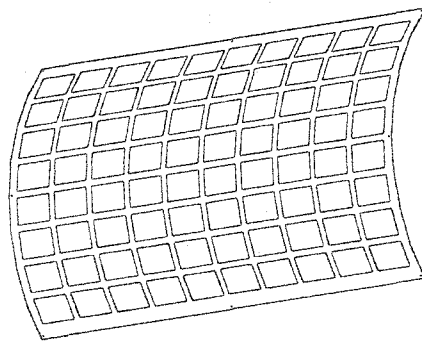


Figure 1 Trois techniques de production de tôles avec poches

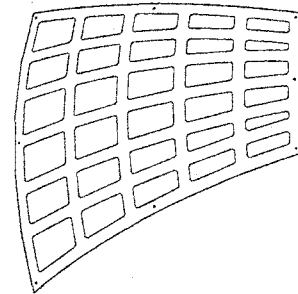
Selon les chiffres obtenus en stage, l'usinage chimique est employé chez Bombardier aéronautique sur environ 30 000 pièces annuellement, ces pièces étant réparties en plus de cinq mille modèles différents.

Selon l'usage ou leur position dans l'appareil, ces pièces possèdent des caractéristiques qui permettent de les regrouper en quatre familles.

La première famille, illustrée à la figure 2, correspond aux tôles de revêtement, aussi désignées « panneaux de revêtement », créées à partir de surfaces à simple ou double courbure, et comportant des poches de profondeur uniforme. Ce type de pièces constitue la plus grande famille et représente environ 45% du volume total de pièces usinées chimiquement.



PANNEAU À SIMPLE COURBURE



PANNEAU À DOUBLE COURBURE

Figure 2 Tôles avec poches d'épaisseur uniforme

La deuxième famille, figure 3, regroupe les pièces comptant peu de poches, mais dont les contours des poches comportent une géométrie plus complexe. Cette famille représente environ 30% du volume total de pièces.

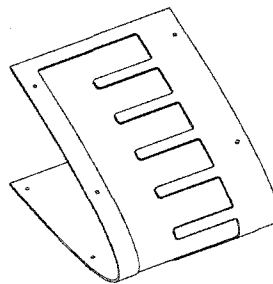


Figure 3 Tôle à poche unique complexe

La troisième famille, quant à elle, regroupe les pièces comportant des poches à profondeurs multiples utilisées pour obtenir une meilleure répartition des contraintes mécaniques à travers la pièce. Cette famille représente environ 20% du volume total de pièces et est illustrée à la figure 4.

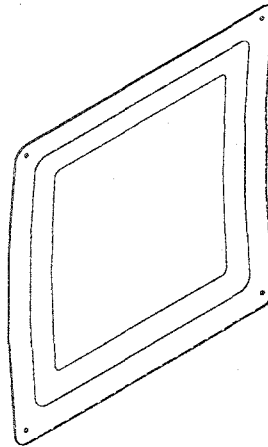


Figure 4 Tôle à poche à profondeurs multiples

Finalement, la quatrième famille, représentant seulement 5% du volume total de pièces usinées chimiquement, correspond aux pièces comportant des îlots à l'intérieur des poches, pour des applications particulières tel le positionnement de points de supports ou de drains. On peut voir un tel panneau à la figure 5.

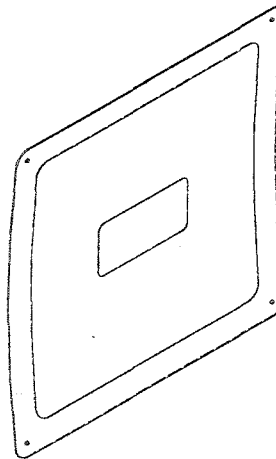


Figure 5 Tôle à poche avec îlot

Les deux premières familles de pièces demandent un type similaire d'outillage, soit un gabarit doté d'ouvertures de grandeurs définies par les règles de conception aux endroits où les poches sont retrouvées. On peut voir des échantillons de tels gabarits de découpe à la figure 6.

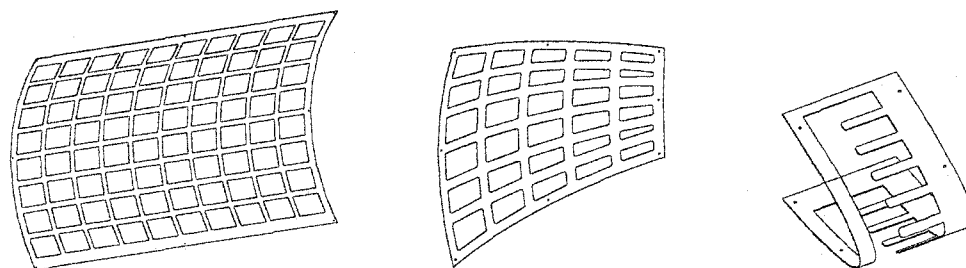


Figure 6 Gabarits de découpe pour poches à profondeur uniforme

Les deux dernières familles demandent un type différent d'outillage de découpe. Dans ces cas, le fait de devoir découper successivement des portions du revêtement protecteur, ou encore de devoir conserver certaines portions non attaquées, nécessite des guides de découpe aux formes différentes. Pour éviter d'avoir à produire divers outillages pour chacune des étapes de trempage, les différents contours à découper sont retrouvés sur le même gabarit. Cependant, pour que l'outillage soit monobloc et ne comporte pas de pièces mobiles, il se présente comme un gabarit comportant des rainures permettant le passage de l'outil de coupe. On peut voir un tel outillage à la figure 7.

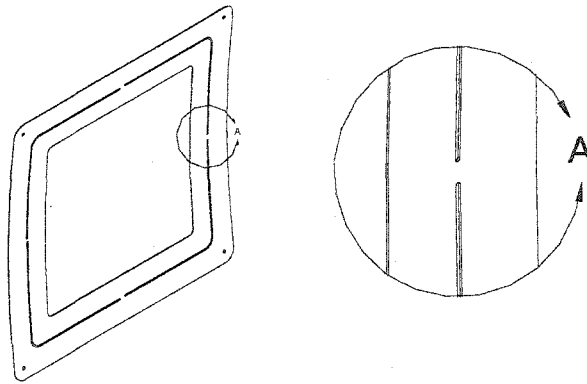


Figure 7 Gabarit de découpe pour poche à profondeurs multiples

1.3 L'usinage chimique des tôles

Le procédé d'usinage chimique en lui-même n'est pas récent : l'attaque du plomb à l'aide de vinaigre se faisait déjà à des fins décoratives environ 400 avant J.-C.[2], mais il a fallu attendre beaucoup plus longtemps avant que des solutions corrosives suffisamment concentrées puissent attaquer les métaux plus structuraux. Les procédés relatifs à la préparation des solutions alcalines, des acides sulfurique et hydrochlorique remontent à la deuxième moitié du neuvième siècle. Les solutions étaient alors employées à des fins médicales et artistiques (pigments pour peinture et verre). Avec le quinzième siècle apparaissait la première technique nous amenant à l'usinage chimique actuel : l'attaque chimique des armures (*armor etching*). Un exemple d'usage décoratif de l'attaque chimique est présenté à la figure 8.

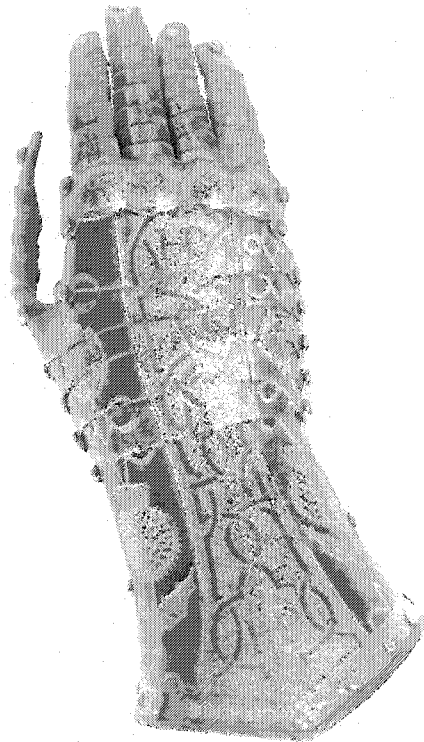


Figure 8 Attaque chimique décorative [2]

Le dix-neuvième siècle a vu une nouvelle application de l'attaque chimique : les débuts de la photographie. Cela a amené les développements qui servent aujourd'hui à la production des circuits imprimés et à la micro-électronique.

En aéronautique, l'usinage chimique est employé dans la fabrication des tôles de revêtement des avions. Cette innovation est attribuée à Manuel C. Sanz, ingénieur à la North American Aviation en 1953 [2], qui résolut un problème de poids excédentaire sur des enveloppes de missiles. L'idée générale est la suivante : pour procéder à l'assemblage mécanique des panneaux de revêtement à la structure, une certaine quantité de matière est nécessaire à la manipulation et au maintien de la cellule à l'aide de rivets. Cependant, les contraintes mécaniques engendrées dans la cellule complétée ne demandent pas une aussi grande quantité de matière. On a donc pensé à fabriquer des panneaux de revêtement à épaisseurs multiples : une épaisseur globale servant à faire la liaison avec les différentes pièces de structure et des épaisseurs

inférieures servant à offrir une résistance suffisante aux contraintes engendrées lors des diverses situations d'utilisation, dont le décollage et l'atterrissage, situations plus extrêmes.

Le stage effectué à l'été 2003 a permis de dresser la liste des différentes étapes de production d'une pièce par usinage chimique et des paramètres à considérer pour ce procédé.

Avec la technique employée actuellement, pour que seules les zones requises soient attaquées chimiquement, il est nécessaire que les portions à protéger soient masquées avec un revêtement à l'épreuve de l'acide. Ce revêtement est appliqué sur la totalité de la pièce par trempages successifs dans un bassin de revêtement protecteur et est ensuite découpé à l'aide d'un gabarit de découpe. Le découpage doit se faire avec précaution pour respecter la forme et les dimensions de la poche désirée, sans abîmer la surface de la pièce; une égratignure, si minime soit-elle, entraînera des conséquences pouvant forcer le rejet de la pièce après l'usinage chimique. Une fois la pièce protégée, elle est trempée dans un bain d'acide pour une durée relative à la quantité de matière devant être érodée par l'attaque.

Lorsque l'érosion est complétée, la pièce est enlevée du bain d'acide et nettoyée de l'acide et de son revêtement protecteur. La pièce est maintenant prête aux opérations ultérieures.

1.4 L'outillage aéronautique

La fabrication d'un aéronef est une tâche exigeant de très grands moyens techniques et technologiques. Qu'il soit petit ou grand, l'appareil, une fois complété, comportera plusieurs milliers de pièces aux géométries différentes, faites de divers matériaux et nécessitant de très nombreux procédés de fabrication.

L'outillage peut prendre de multiples formes. Un outillage peut être composé d'une seule ou d'un très grand nombre de pièces, être portable ou stationnaire, exiger

l'utilisation de force humaine, électrique, pneumatique ou hydraulique. Selon Soors [3], dix-huit catégories d'outillages peuvent être répertoriées pour la fabrication de pièces d'aéronefs commerciaux.

Comme on pourra le constater, les formes et les types d'outillages sont très variés et répondent aux besoins de fabrication, d'assemblage, de transport ou d'entreposage de tout ce qui peut s'avérer nécessaire à la construction d'aéronefs. À titre d'exemple, le calibre de profondeur présenté à la figure 9 est une petite pièce d'outillage manuel destiné à l'inspection des pièces usinées.

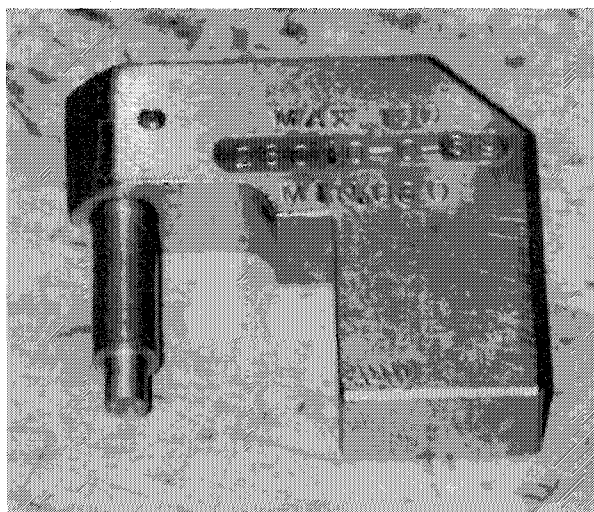


Figure 9 Calibre de profondeur
Courtoisie École nationale d'aérotechnique

Le gabarit de montage, illustré à la figure 10, sert à l'assemblage de structures. Il permet de positionner et de maintenir les différents éléments de structure d'un fuselage.

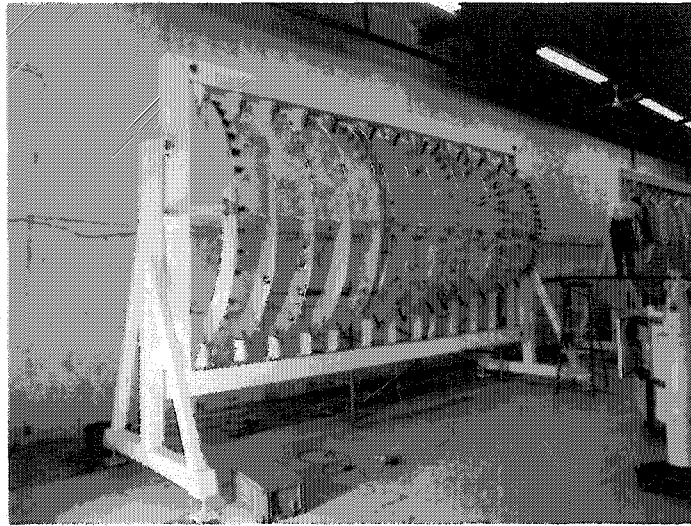


Figure 10 Gabarit de montage
Courtoisie Péga Précision

L'outillage de découpe, présenté à la figure 11, sert à positionner et à façonner le nid d'abeilles utilisé comme renfort dans la confection des pièces faites de matériaux composites. On peut remarquer ici que l'outillage utilise un système de positionnement de la pièce brute, un système pour le déplacement de l'outil de coupe et un système de dépoussiérage.

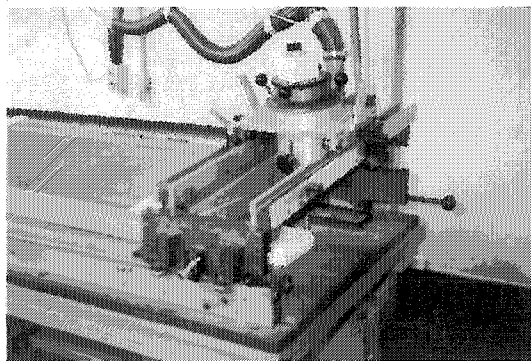


Figure 11 Outillage de découpe
Courtoisie Shorts Brothers PLC

On voit ici un poinçon-matrice servant à la découpe de joints d'étanchéité à l'aide d'une presse manuelle. Ce genre d'outillage est utilisé pour la production de petites séries de pièces.

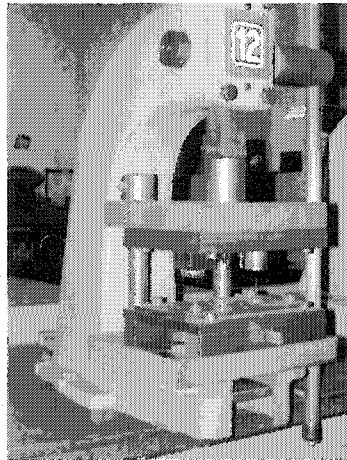


Figure 12 Poinçon-matrice manuel
Courtoisie École nationale d'aérotechnique

Le chariot, présenté à la figure 13, est un outillage de transport d'outils destiné à apporter les pièces faites de matériaux composites et leurs moules à l'intérieur de l'autoclave dans lequel se produira la polymérisation des matériaux. Les rails intégrés au plancher, eux aussi, font partie de l'outillage nécessaire à la production composite.

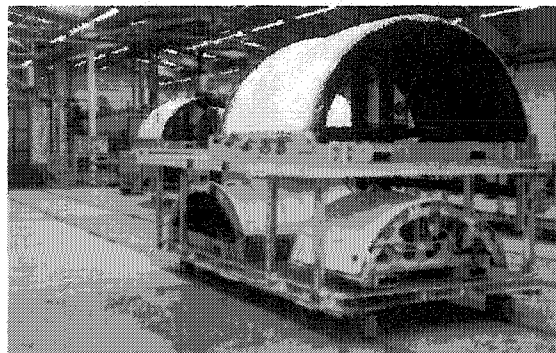


Figure 13 Chariot
Courtoisie Shorts Brothers PLC

La figure 14 illustre un gabarit de perçage employé pour positionner rapidement un foret, lors du perçage manuel d'une pièce.

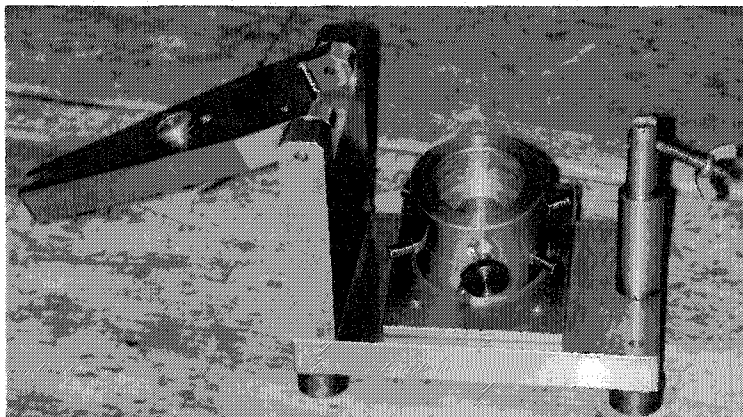


Figure 14 Gabarit de perçage
Courtoisie École nationale d'aéronautique

La figure 15 montre un outillage de support de cellule servant à soutenir la structure d'un appareil, lorsque son train d'atterrissage est démonté.

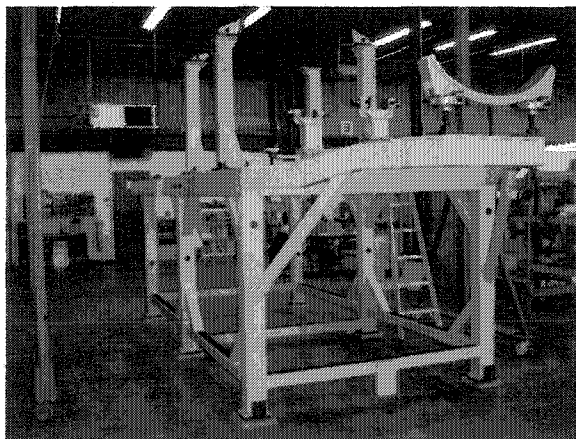


Figure 15 Outillage de support de cellule
Courtoisie Péga Précision

L'outillage peut aussi se présenter sous forme modulaire. Dans certains cas, la modularité servira à réutiliser les éléments d'un outillage dans un autre lorsque le

premier ne sera plus utilisé. Dans d'autres cas, la modularité sert à augmenter les fonctionnalités de l'outillage par l'usage de divers composants. Le support d'outillage suivant est un exemple d'outillage modulaire.

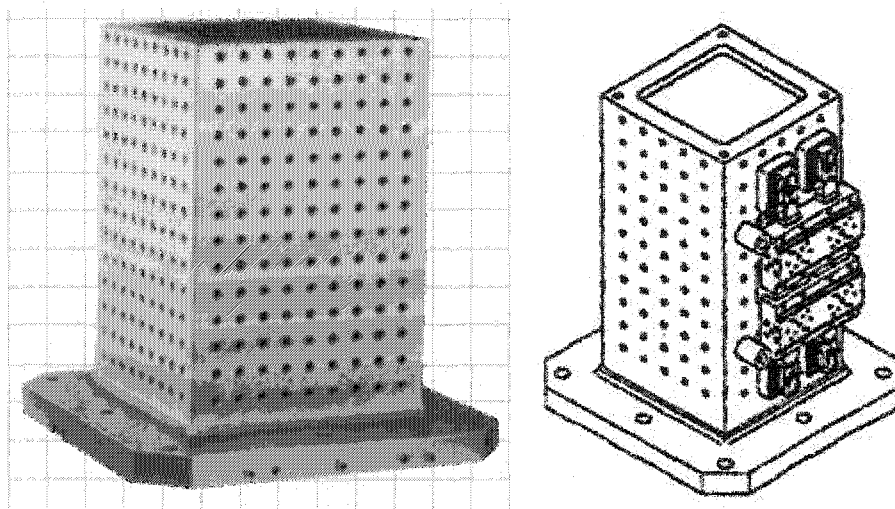


Figure 16 Support d'outillage modulaire [4]

1.5 Les gabarits de découpe

Les gabarits de découpe eux-mêmes sont au centre de notre problématique. Ces derniers peuvent être faits d'aluminium, d'acier ou de fibre de verre, et doivent permettre un positionnement adéquat sur la pièce manufacturée à traiter. Ces gabarits peuvent être utilisés pour d'autres procédés manufacturiers tel le toupillage, mais celui qui nous intéresse doit permettre une découpe du revêtement qui produira, après usinage chimique, des poches créées aux dimensions désirées.

Des règles guident la conception des ouvertures à prévoir dans le gabarit. Ces ouvertures permettent de découper le revêtement de masquage de manière à exposer la tôle sur une surface légèrement inférieure à la surface finie de la poche pour tenir compte de l'attaque latérale du matériau par l'acide. La géométrie de ces ouvertures est donc contrainte par la géométrie de la pièce à fabriquer.

Cet outillage est relativement simple au point de vue conception et fabrication. Cependant, comme il a déjà été mentionné, avec un volume de plusieurs milliers de pièces différentes produites à l'aide de ce procédé, il peut être rentable, pour réduire les délais, de développer une méthodologie et éventuellement un outil informatique automatisé dédié à cette tâche.

La figure 17 montre une pièce et le gabarit de découpe y étant associé.

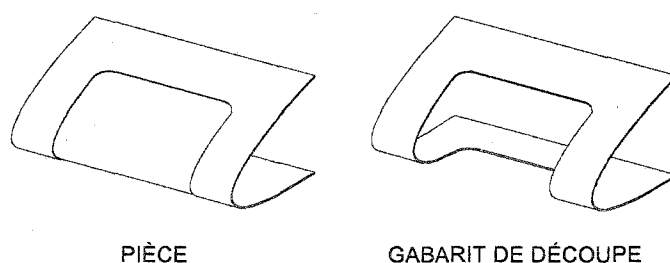


Figure 17 Pièce usinée chimiquement et gabarit de découpe

La figure suivante présente un ouvrier découpant le revêtement protecteur, à l'aide d'un gabarit de découpe, sur une pièce destinée à être usinée chimiquement.

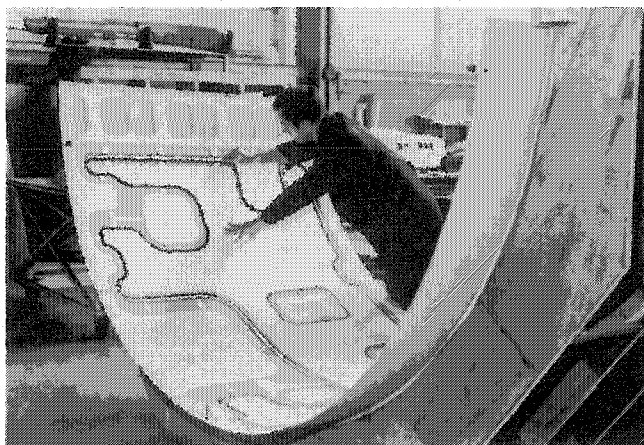


Figure 18 Découpe de revêtement protecteur [2]

1.6 La CAO en conception unifiée

L'avènement de la conception assistée par ordinateur (CAO) tridimensionnelle, de la modélisation solide et des maquettes numériques, permet aux entreprises de résoudre virtuellement bien des problèmes avant qu'ils ne surviennent en atelier.

Auparavant, la description des géométries et les calculs d'ajustement s'y rattachant étaient produits sur table à dessin, ce qui rendait l'analyse tridimensionnelle très ardue. Avec la venue des outils de CAO, le travail de conception s'est enrichi d'outils favorisant la précision et l'exactitude. Qu'il s'agisse de simplifier la visualisation spatiale, de modifier plus rapidement les modèles et d'en obtenir tout aussi rapidement des dessins corrigés, de transmettre l'information relative à la géométrie à des systèmes de fabrication assistée par ordinateur (FAO) qui permettent l'usinage en série ou encore l'usinage de pièces aux formes complexes, les outils de CAO sont maintenant indispensables aux concepteurs des produits autant qu'à ceux des outillages. Cependant, on cherche constamment à améliorer la performance de ces outils informatiques et le domaine de la conception d'outillage n'échappe pas à cette tendance.

L'augmentation de la popularité des outils informatiques a permis l'apparition d'un bon nombre de fonctions d'assistance aux concepteurs. La disponibilité de bibliothèques de pièces standards par exemple, préparées à l'aide d'un logiciel donné et rendues accessibles aux concepteurs soit en format natif ou à l'aide d'un protocole de transfert, permet déjà une économie de temps en évitant au concepteur d'en faire la modélisation. Ce type de fonctionnalité peut servir d'inspiration à la création de solutions dans le domaine de la conception d'outillage.

De plus, des outils de conception de produits orientés métier, s'insérant dans le logiciel de CAO sous forme d'un menu supplémentaire ou disponibles par la voie de solutions externes (*Third-Parties*), ont été développés pour permettre des économies de temps, lors de la modélisation de certaines géométries complexes demandant une série de tâches répétitives de création d'éléments géométriques ou d'opérations de calcul. Ces

outils peuvent évidemment servir d'inspiration à des solutions similaires pouvant être utilisées en conception d'outillage.

Des exemples du développement de modules propres à un type de conception peuvent être cités : SHM_AERO et COV_ENG dans CATIA¹ [5], ou encore Powerpack dans Mechanical Desktop² [6] permettent de voir de quelle façon un logiciel peut augmenter la productivité des concepteurs.

SHM_AERO est un module offrant une assistance au concepteur pour la modélisation et la définition de pièces de métal en feuille. En plus de faciliter la modélisation de caractéristiques géométriques reliées au domaine d'application, le module offre à l'utilisateur de produire automatiquement le dessin de définition de la pièce modélisée.

COV_ENG est un module permettant, entre autres, au concepteur de pièces en matériaux composites de déterminer et d'évaluer la formabilité des géométries utilisées pour les plis du matériau, de créer un lien avec un module d'analyse pour évaluer la qualité mécanique de la pièce, de produire le modèle 3D à employer dans la maquette numérique et de produire les documents techniques facilitant la fabrication de la pièce. Ce module fait une certaine intégration de la conception et de la fabrication puisqu'il demande au concepteur de considérer les aspects manufacturiers lors de la conception de la pièce.

Powerpack regroupe des bibliothèques de pièces standard telles des engrenages, vis, boulons et ressorts provenant de divers manufacturiers. De plus, il permet d'accomplir certains calculs de conception reliés, par exemple à la déflexion, au choix de ressorts, etc.

¹ CATIA est une marque déposée de Dassault Systèmes.

² Mechanical Desktop est une marque déposée de Autodesk Inc.

Des logiciels externes se greffant aux outils de CAO offrent des avantages semblables. On peut ici penser à FiberSim³ [7] ou Moldflow Plastic Advisers⁴ [8], qui proposent aux concepteurs des outils destinés à des tâches très spécialisées.

FiberSim est un logiciel qui offre des fonctionnalités semblables à celles du module COV_ENG de CATIA V4 ou Composites de CATIA V5, mais sous la forme d'une solution indépendante fonctionnant sur différentes plates-formes CAO (CATIA, ComputerVision⁵ [9], Unigraphics⁶ [10], etc.).

Moldflow Plastic Advisers facilite le travail des concepteurs de pièces de plastique injecté en permettant de prévoir l'écoulement du matériau dans le moule en fonction du positionnement des conduits du réseau d'alimentation ainsi que de l'emplacement des embouchures de remplissage. Tout cela aide à la conception d'une pièce, mais aide peu à la modélisation unifiée pièce-outillage.

Les outils destinés à assister les concepteurs dans leur tâche de modélisation d'outillages mécaniques sont souvent limités. Dans certains cas, il s'agit d'applications où des formes de pièces sont prédéfinies et où les paramètres à employer doivent être entrés manuellement : on pense ici aux fonctions d'assistance à la création de structures d'acier proposant au concepteur une librairie de profilés standards auxquels il ne reste qu'à ajouter les dimensions. Dans d'autres cas, on retrouvera des options spécialisées tentant de capter et d'appliquer l'intention de conception à la création des modèles : pour ces mêmes modules de structure, des fonctions permettront de calculer les coupes à faire entre deux éléments structuraux et même de choisir le type d'attachement requis entre ces éléments.

Devant la diversité des tâches regroupées sous le chapeau de la conception d'outillage, il est difficile d'envisager l'existence d'un outil permettant l'automatisation des tâches relevant de tous les sous-domaines de la conception d'outillage. On peut plutôt songer

³ FiberSim est une marque déposée de Vistagy Inc.

⁴ MoldFlow Plastic Advisers est une marque déposée de Moldflow Inc.

⁵ ComputerVision est une marque déposée de ComputerVision Corporation.

⁶ Unigraphics est une marque déposée de UGS Inc.

à des outils spécialisés pour des tâches spécifiques tels le maintien de pièces à usiner, la création de moules pour pièces composites, la conception de gabarits de découpe, etc. C'est d'ailleurs vers ce genre d'application que se dirigent les efforts de ce projet.

Il est également utopique d'espérer développer un outil informatique capable de remplacer un concepteur d'outillage en appliquant une série de règles prédéfinies à la résolution d'un problème spécifique de conception d'outillage. Cependant, en faisant une analyse rigoureuse des tâches exécutées par les concepteurs, il peut être envisagé de cibler certaines pratiques qui peuvent être automatisées. Avec un volume d'environ trente mille pièces usinées chimiquement chaque année, un projet visant à améliorer la méthodologie reliée à cette spécialité d'outillage se montre rentable très rapidement. Cette méthodologie de modélisation unifiée des pièces et de leurs outillages permettra d'exploiter les mécanismes de gestion des liens technologiques rendus disponibles par la nouvelle génération d'outil de CAO.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE DE LA CONCEPTION UNIFIÉE PIÈCE-OUTILLAGE

2.1 Introduction

Lorsque la table à dessin était le seul outil disponible pour parvenir à la description géométrique et spatiale d'une pièce, des techniques existaient pour calculer des projections et des positionnements tridimensionnels, mais les efforts requis pour accomplir ces tâches limitaient le travail à la conception et au dessin final des pièces et des assemblages.

De façon générale, les responsabilités de conception des pièces et de l'outillage sont réparties de la façon suivante en entreprise : Le bureau d'études, auquel on réfère souvent par *l'ingénierie*, procède à la conception des maquettes et des modèles de pièces. Il est responsable de la conception géométrique et de la production des dessins de définition des pièces finies. Le bureau des méthodes verra à adapter les modèles des pièces de manière à permettre ou à faciliter leur fabrication ou leur formage et à faire la production des dessins de fabrication. Entre la maquette numérique – *le contexte* et les pièces elles-mêmes, une première série de liens technologiques seront établis. Un lien technologique se définit comme un lien exprimant une dépendance entre deux éléments d'information [11]. D'autres liens technologiques seront aussi établis entre les pièces et les outillages associés, toute modification apportée à une pièce amenant automatiquement une modification de l'outillage. Cette distribution des responsabilités de conception est représentée à la figure suivante. Encore aujourd'hui, la plupart de ces liens sont éphémères. On peut voir l'usage des liens technologiques en conception d'outillage à la figure 19.

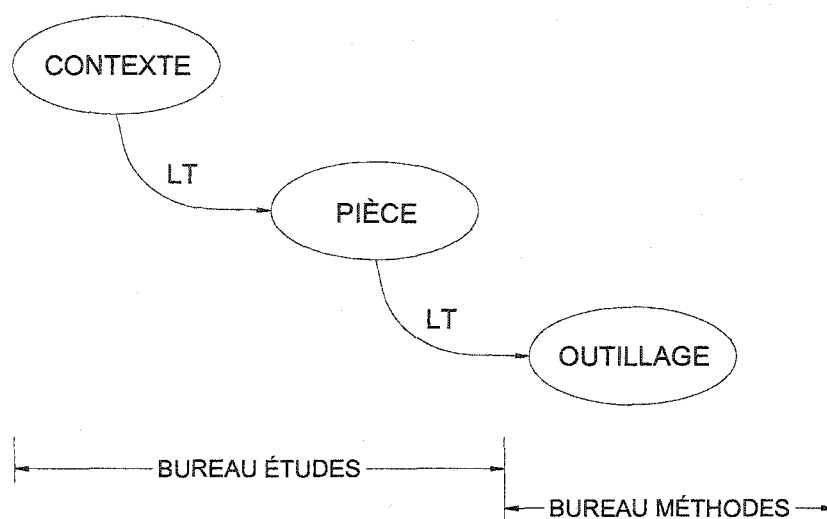


Figure 19 Liens technologiques lors de la conception de pièce et d'outillage

La venue des outils de CAO a facilité la vérification et la visualisation virtuelle des objets. Cependant, il n'est pas rare de voir un concepteur à l'ingénierie modéliser une pièce dont il rendra les spécifications disponibles par voies de dessins et de voir ensuite le concepteur du bureau des méthodes procéder à sa propre modélisation de la même pièce ou de certains éléments géométriques de la pièce, pour reproduire la géométrie qui lui servira à compléter sa tâche. Le travail fait en aval, outillage ou programmation NC par exemple, se conformera à la géométrie de la seconde pièce modélisée, mais ce travail aval ne sera pas toujours facile à modifier en cas de changement apporté à la première pièce, en raison de la nature éphémère des liens employés.

Avec les outils de CAO de la génération de CATIA V4, les modèles sont généralement liés par des liens éphémères au moment du transfert de géométries, mais pas par des liens persistants.

On introduira ici les notions originales de liens technologiques éphémère et persistant : on entend par lien éphémère tout lien qui existe au moment de la création de la

géométrie mais qui disparaît ensuite, comme la notion de distance entre deux lignes parallèles sous CATIA V4 par exemple. Le lien persistant, lui, commencera à exister au moment de sa création et restera constamment accessible à l'utilisateur et exploitable lors de modification ultérieure, comme dans le même cas de distance entre lignes parallèles dans une esquisse sous CATIA V5.

Le cas d'application choisi, celui de la production d'une méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage appliquée aux tôles et gabarits de découpe, permettra d'explorer les avantages des liens persistants et de vérifier l'applicabilité et les gains potentiels liés à l'usage de tels liens dans la conception d'outillage. Cette exploration faite, il sera éventuellement possible d'en utiliser les résultats pour travailler au développement d'un outil automatique de conception de gabarits de découpe, la méthodologie développée étant transposable dans l'outil automatique. Il est à noter que la problématique de l'utilisation des liens persistants à l'intérieur des opérations du département d'ingénierie, dans un concept produit-produit par exemple, est probablement très proche de celle du projet, mais n'a pas été explorée.

Dans ce chapitre nous verrons, appliquées au domaine des tôles de revêtement aéronautique, les méthodologies utilisées actuellement pour la modélisation des pièces et des gabarits de découpe ainsi que les possibilités que nous laissent entrevoir les outils de la nouvelle génération de logiciels de CAO. Une synthèse de la problématique sera faite et les objectifs de recherche seront proposés.

2.2 Étude de cas : La production des tôles de revêtement

Le cas des tôles de revêtement et des gabarits de découpe a été choisi comme cas d'étude du problème de méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage en raison de leurs géométries spatiales proches : techniquement parlant, les pièces sont collées l'une sur l'autre partout où il n'y a pas de poche. Les géométries virtuelles sont donc très voisines.

2.2.1 Méthodologie de modélisation actuelle

La méthodologie de modélisation actuelle chez Bombardier aéronautique s'appuie encore principalement sur l'usage du logiciel CATIA V4 [1]. La version 5 du logiciel est en phase de déploiement initial et devrait être en utilisation pour l'ensemble des processus de développement et de maintenance de produit d'ici les trois à cinq prochaines années. Cette méthodologie servira de référence pour les comparaisons de temps faites dans les tests. La méthodologie se penche d'abord sur la modélisation de la pièce et ensuite sur la modélisation du gabarit de découpe.

2.2.1.1 Modélisation de la pièce

Dans le cas des tôles, la méthodologie de modélisation actuelle dépend du fait que la pièce soit produite en contexte ou non. Si la tôle sert au revêtement de l'appareil, le positionnement des poches d'allègement est régi par les positions respectives des cadres, des lisses ainsi que de tout élément structural ou fonctionnel ayant contact avec le fuselage. Le positionnement de chacune des poches est donc dépendant du contexte dans laquelle elle est produite. Dans d'autres cas, la géométrie de la poche relève d'autres considérations, comme c'est le cas pour les tôles doublant celles du bord d'attaque des ailes et étant attaquées chimiquement pour créer des cavités servant à véhiculer de l'air chaud servant au dégivrage. Dans de tels cas, la forme de la poche est davantage liée à des contraintes aérodynamiques qu'à des contraintes structurelles.

2.2.1.1.1 Pièce sujette au contexte

Lorsqu'une pièce sera conçue en fonction de son contexte, il sera d'abord nécessaire de charger, en CAO, un assemblage des pièces à utiliser, en contexte, sous forme d'un fichier de type session. Des exemples de tels assemblages sont présentés à la figure 20.

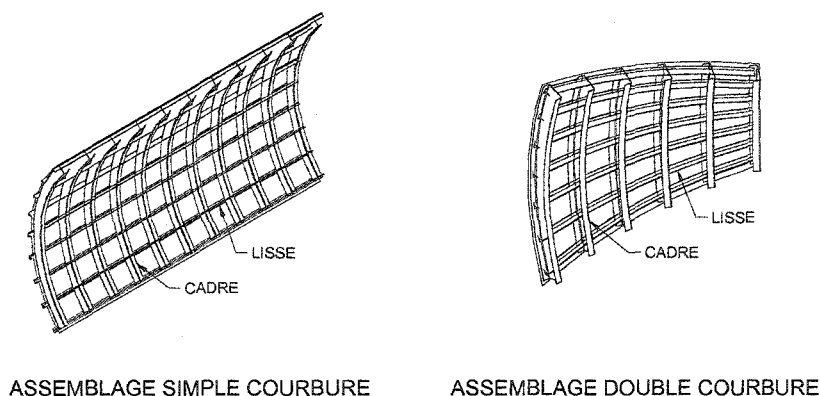


Figure 20 Exemples d'assemblages

Une poche est généralement créée à l'intérieur de chaque quadrilatère formé d'une paire de cadres et d'une paire de lisses. Une fois le contexte chargé, les éléments géométriques nécessaires à la définition des contours des poches (courbes, plans, etc. correspondant aux limites à prendre en considération pour une poche donnée) sont reproduits ou transférés au modèle de la tôle de revêtement. Ces éléments sont utilisés pour localiser les rebords de la poche à produire, en respectant généralement une distance géodésique de .100 pouce. Cette distance inclut alors les tolérances nécessaires pour s'assurer qu'en toute circonstance le contour d'une poche ne se retrouve jamais sous un élément de structure environnant. Une fois les positions des contours des poches établies, des congés sont placés à toutes les intersections. Ces derniers ont une valeur de .5 pouce. Tout changement structurel amenant un changement de position d'un cadre ou d'une lisse entraînera une redéfinition partielle ou complète du contour de la poche.

Étant donné la forme généralement complexe des tôles de revêtement aéronautiques, la géométrie nécessaire repose généralement sur des surfaces à simple ou double courbure, et rarement sur des régions planes. La création des courbes nécessaires à la description des poches sur les pièces, comme par la suite les ouvertures de l'outillage, requiert donc des fonctionnalités CAO permettant la copie parallèle de courbes sur une surface ainsi que la possibilité de créer des congés de raccordement sur les différentes courbes, pour limiter les contraintes dans les coins.

Il est nécessaire de souligner l'importance du respect de l'approche géodésique si l'on veut éviter des distorsions sur les formes et rester à l'intérieur des tolérances requises. On voit clairement sur la figure 21, que les formes très accentuées peuvent amener des variations considérables sur les positions relatives que pourraient représenter des copies parallèles euclidiennes par rapport aux copies géodésiques.

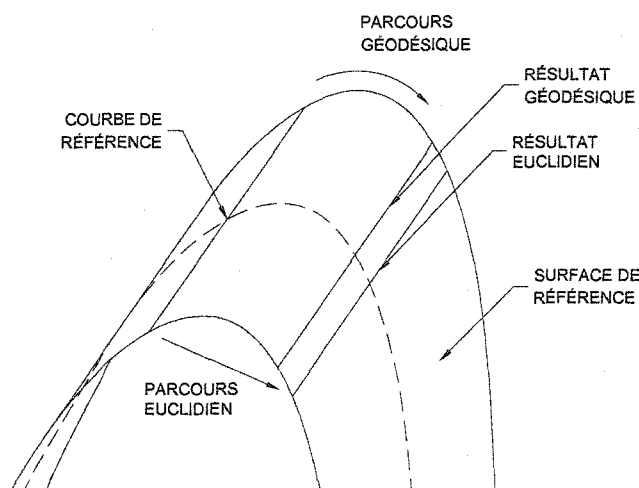


Figure 21 Décalage géodésique et euclidien

Puisque les relations technologiques existant entre les éléments géométriques décalés dans un modèle et entre les modèles d'une tôle et de son outillage, sont des relations éphémères, toute modification apportée au contexte demandera l'intervention des concepteurs pour propager cette modification. Le changement effectué s'appuiera sur des relations tout aussi éphémères que les précédentes.

2.2.1.1.2 Pièce indépendante du contexte

Si la tôle nécessite des poches dont la géométrie n'est pas contrainte par la position d'éléments environnants, la production de la géométrie des contours de poches sera assurée par la création d'éléments de support (courbes, plans, etc.) selon les besoins identifiés par le concepteur. Le modèle de la tôle s'appuiera donc sur quelques

éléments de référence, habituellement de type surfacique, mais ne sera pas contraint par un assemblage.

2.2.1.2 Modélisation du gabarit de découpe

Dans la méthodologie de conception actuelle pour les gabarits de découpe [1], le concepteur d'outillage récupère le modèle de la pièce d'ingénierie qui devra être usinée chimiquement et l'utilise pour créer le modèle de l'outillage. Après avoir sauvegardé le fichier sous le nom de l'outillage qui devra être modélisé, il en efface le solide et la géométrie lui étant inutile pour ne conserver que la géométrie nécessaire à la définition des poches (surfaces, courbes et plans).

Les courbes formant le contour de la poche sont déportées vers le centre de celle-ci d'une distance définie, à l'aide de règles de conception servant à intégrer dans le concept une provision pour l'attaque de la pièce à usiner sous la surface du masque. De façon générale, la distance de décalage employée s'approche de .0625 pouce. On peut voir une illustration de cette opération à la figure 22.

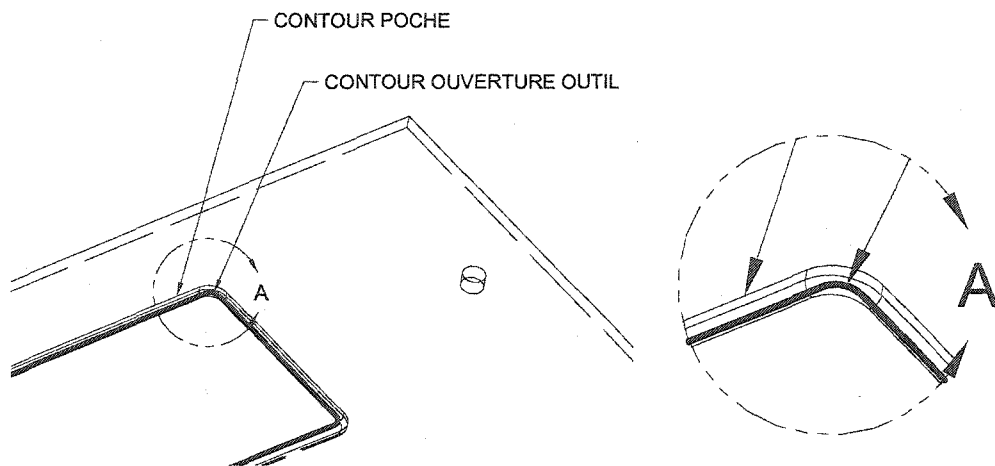


Figure 22 Décalage entre gabarit et tôle

Le résultat des deux étapes de modélisation est représenté à la figure 23. On peut y voir une pièce et le gabarit de découpe qui servira à tailler le revêtement protecteur pour préparer la pièce à l'usinage chimique.

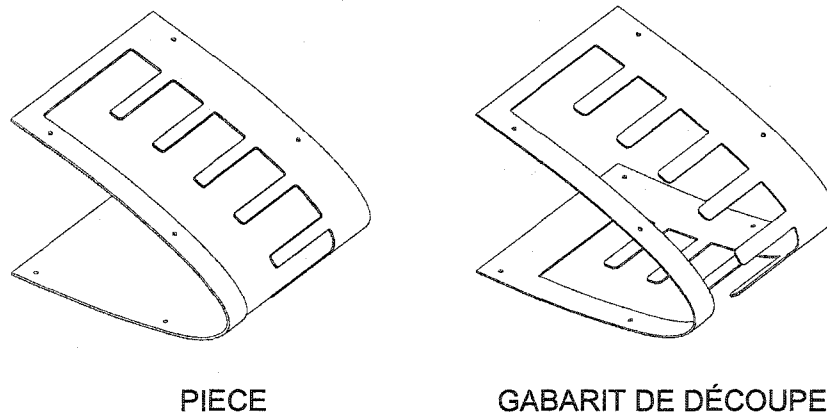


Figure 23 Exemple de pièce et de gabarit de découpe

On soulignera encore une fois la nature éphémère des liens établis entre le contour de la poche et le contour de l'ouverture du gabarit de découpe.

2.3 L'émergence d'une nouvelle génération d'outils de CAO

La venue d'une nouvelle génération de logiciels CAO amène de nouvelles possibilités quant à la façon dont une pièce et son outillage seront liés.

Si, avec la génération précédente, les fichiers d'une pièce et de l'outillage lui étant attaché se présentaient comme deux fichiers liés par des relations technologiques éphémères, il n'en est plus de même avec les générations de logiciels actuelles. Les outils de CAO de la nouvelle génération utilisent des nouveaux liens pour jouer un rôle similaire à celui de leurs prédécesseurs, mais ces liens ont un caractère persistant.

Les nouveaux outils sur le marché offrent la possibilité de créer des liens technologiques persistants entre des fichiers ou des parties de fichiers, ce qui permet

qu'un changement apporté aux éléments de référence soit propagé aux éléments cibles utilisant ces références. Ceci est un pas important dans l'évolution des méthodologies de conception des outillages, puisque ce nouvel atout permet de faciliter la propagation des changements tout en assurant le maintien de la cohérence entre les modèles. On peut donc parler d'une nouvelle approche de conception unifiée pièce outillage dans le contexte de la production manufacturière. Ce type d'innovation demande cependant de reconsidérer les sentiers connus, de les évaluer et de s'interroger à savoir si d'autres avenues n'étaient pas plus profitables pour accomplir encore mieux, aujourd'hui, les tâches qui étaient considérées comme réalisées correctement hier.

2.4 Synthèse et objectifs de recherche

La méthodologie actuelle de modélisation de tôles et des outillages associés présente les fichiers de la pièce et de son outillage comme des fichiers voisins, utilisant des géométries dérivées l'une de l'autre, par des liens éphémères, mais non unies par des liens technologiques persistants.

L'ajout de liens persistants à la structure de données du modèle produit, dans le domaine de l'outillage, permettra de capitaliser sur la transmission de l'information, originale ou modifiée, du modèle d'une pièce vers toutes les autres applications retrouvées en aval. Cette situation sera opposée à la situation actuelle où les liens éphémères exigent une propagation manuelle des modifications.

L'exploitation de la puissance de ces liens technologiques pour les applications en aval, mais plus spécifiquement pour le cas de la conception unifiée pièce-outillage, repose cependant sur une organisation adéquate des liens.

L'objectif fondamental du projet consistera à vérifier le rôle des liens technologiques dans une application qui découle de la définition du produit parce que jusqu'ici, les travaux effectués s'intéressaient à l'application de ces liens au sein de la définition du produit.

On pourra donc se poser les questions suivantes :

- Est-il faisable d'employer efficacement des liens technologiques persistants dans le cas de la modélisation unifiée pièce-outillage?
- Est-il possible de faciliter la propagation de changements en utilisant ces liens persistants?
- Est-il nécessaire de développer de nouvelles approches méthodologiques pour exploiter les avantages de la nouvelle génération d'outils de CAO?
- Si la réponse aux questions précédentes est oui, quels sont les gains réalisés?

Les résultats des tests effectués permettront d'évaluer la pertinence de faire l'introduction de liens technologiques persistants dans la méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage. Ces résultats pourront être éventuellement utilisés dans le cadre d'un travail visant la création d'un outil automatique de conception de gabarits de découpe.

Pour répondre à ces questions nous utiliserons la méthodologie de recherche suivante :

- Stage en entreprise pour faire une cueillette de données sur le procédé industriel de l'usinage chimique et sur les méthodologies de modélisation employées industriellement;
- Recherche bibliographique pour répertorier les travaux déjà publiés dans les domaines associés;
- Exploration des outils de CAO et des avenues de modélisation;
- Identification et choix des pièces qui serviront aux tests;
- Élaboration des méthodologies de modélisation ;
- Réalisation des maquettes de travail;
- Tenue des tests de modélisation;
- Tenue des tests de modification;
- Analyse des différents résultats.

CHAPITRE 3

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

D'abord, le présent chapitre présente les travaux de différents chercheurs dans les domaines de l'approche par caractéristiques, de l'outillage, et de la conception unifiée, trois domaines étroitement liés à ce projet. Ensuite les concepts développés au LIPPS sont présentés et illustrés par certains projets passés ou en cours. Dans un troisième temps, certaines fonctionnalités de la nouvelle génération de CAO seront présentées pour mieux illustrer les idées avancées dans ce mémoire. Finalement, une synthèse résumera le tout.

3.1 L'approche par caractéristiques en recherche

La méthodologie de conception unifiée pièce-outillage que nous proposons est fondée sur l'usage de caractéristiques à titre d'entités reliées par des liens technologiques persistants pour établir les relations entre une pièce et son outillage. L'approche par caractéristiques attribue à une géométrie un caractère propre à une tâche à accomplir.

Un énoncé rencontré en de multiples endroits stipule qu'il existe probablement autant de définitions de ce qu'est une caractéristique qu'il y a de chercheurs qui travaillent dans le domaine. Nous retiendrons celle reprise de Brown par McMahon and Browne [12], qui est générale, et qui correspond à notre vision pour ce travail. Dans leur ouvrage, ils utilisent l'explication suivante pour définir ce qu'est une caractéristique :

«A feature is any perceived geometric or functional element or property of an object useful in understanding the function, behavior or performance of that object.»

On distingue les approches de reconnaissance de caractéristiques (*Feature recognition*) et de conception par caractéristiques (*Feature Based Design*). Quoique le concept de conception par caractéristiques soit plus présent dans les outils de la

nouvelle génération de logiciels CAO, celui de la reconnaissance de caractéristiques reste encore au rang des projets de recherche.

Dans son article, Shaw [13] présente les fondements de la modélisation par caractéristiques. Il présente les concepts et méthodologies liés à cette technique pour la définition, la reconnaissance et l'extraction des caractéristiques dans un modèle.

Avec Mantylä [14], il présente les fondements de cette approche nouvelle de modélisation, expliquant les concepts, les techniques de création de caractéristiques, leur application en conception et en usinage, et leur reconnaissance à travers des applications utilisant l'ingénierie basée sur les connaissances. Ils identifient cinq classes de caractéristiques :

- les caractéristiques de forme;
- les caractéristiques de tolérance;
- les caractéristiques d'assemblage;
- les caractéristiques fonctionnelles;
- les caractéristiques matérielles.

Ils reprennent de Hummel [15] un exemple clair de conversion de caractéristiques – *Feature Mapping*. Cette conversion permet de représenter une même pièce sous différents points de vue au moyen de différentes caractéristiques en fonction du métier associé au point de vue. La figure 24 montre une pièce dont une conversion a été produite pour les sous domaines de la conception, l'usinage, l'inspection et l'ébavurage. Ce concept est repris mais adapté à notre problème, alors que nous souhaitons structurer les modèles de pièce et d'outillage pour favoriser l'unification d'une caractéristique « poche », d'une part, et d'une caractéristique « ouverture », d'autre part.

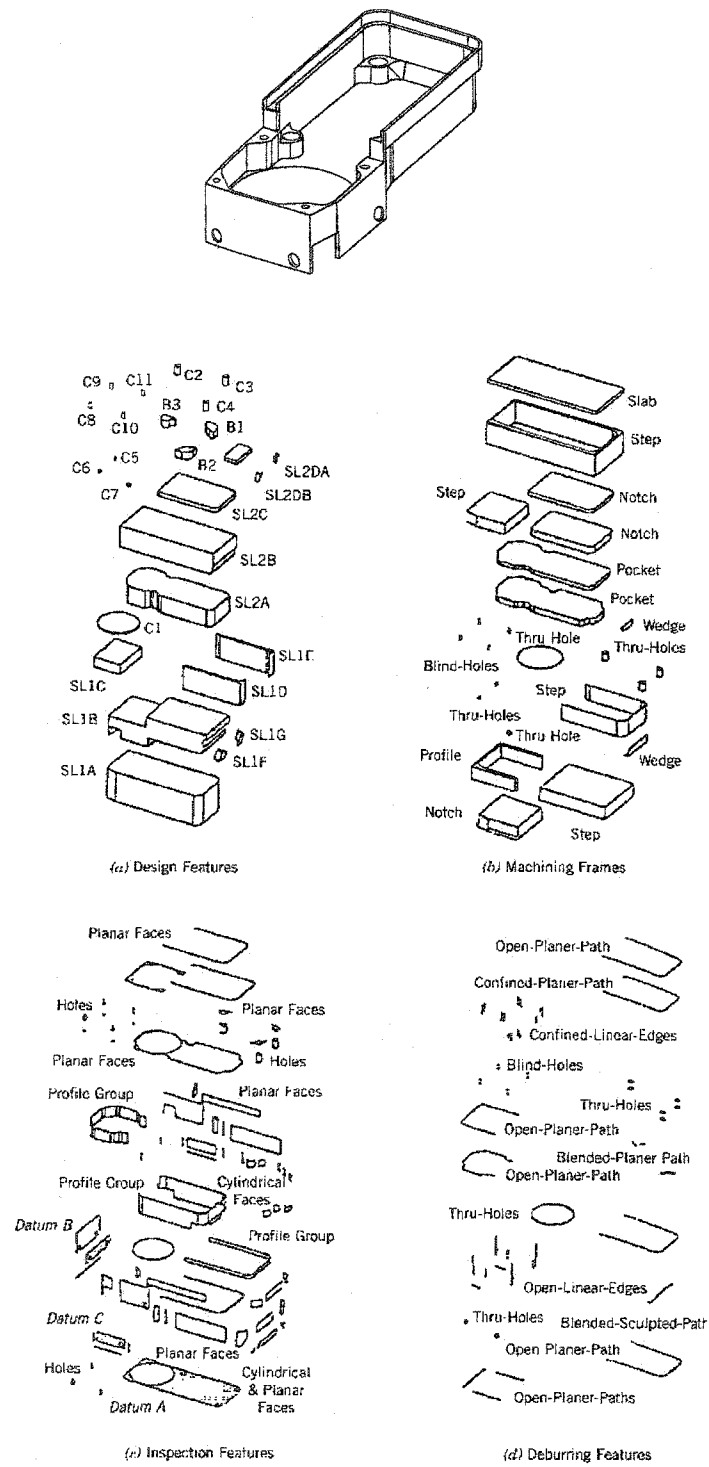


Figure 24 Conversion de caractéristiques [15]

Bidarra et Bronsvoort [16], concentrent leur travail sur la description sémantique de ces caractéristiques. Ils proposent une description des caractéristiques moins indépendantes de l'historique du modèle qui permettra le maintien de la sémantique tout au long du processus de conception.

Pour ce qui est du traitement des caractéristiques internes d'un modèle, Gao et Shah [17] proposent une méthode d'analyse des caractéristiques de la pièce pour différencier les caractéristiques isolées des autres liées par des interactions. Leur approche utilise deux analyses structurales distinctes du modèle B-Rep : l'une utilisant une méthode basée sur l'étude de la structure interne des caractéristiques du modèle (*graph based feature recognition*) et l'autre se servant d'un graphe des conditions minimales des caractéristiques (*feature minimal condition subgraph*) comme indicateur, dans une reconnaissance par indices des caractéristiques (*hint based feature recognition*).

Aussi, pour amorcer la liaison entre le modèle d'une pièce et la préparation de sa séquence de fabrication, Ozturk [18] et al présentent une approche pour automatiser la planification de procédés en couplant une définition des caractéristiques du modèle basée sur la méthodologie d'usinage à l'usage d'un algorithme faisant appel à une matrice de liens hiérarchiques (*precedence matrix*). Leur définition des caractéristiques tient compte d'informations tant géométriques que dimensionnelles telles les dimensions des caractéristiques, la position des axes des trous, les directions d'approches des outils de coupe, etc.

Les articles précédents sont très spécifiques à la description des caractéristiques, mais ne mettent néanmoins rien en lumière pour faciliter l'intégration de l'approche par caractéristiques dans la conception d'outillage.

Évidemment, la conception d'un système de CAO permettant la création d'outillage à partir de la géométrie d'une pièce ne saurait être complète si un mécanisme permettant la propagation des changements n'était intégré et fonctionnel.

Mäntylä [19] a travaillé à la propagation des contraintes et présente une technique fonctionnant dans une famille de pièce, mais l'approche ne s'applique pas à une propagation inter-modèles entre pièce et outillage.

Jha et Gurumoorthy [20] présentent un algorithme traitant la propagation de changements géométriques apportés à un modèle à travers différents domaines d'applications reliés. Leur méthode permet la discrimination des portions non affectées du modèle traité de manière à obtenir un outil de propagation plus efficace.

En bref, la recherche effectuée n'a pas permis de trouver de littérature traitant spécifiquement de l'usage des caractéristiques ou de leur propagation dans des cas liés au domaine de la conception d'outillage.

3.2 L'approche par caractéristiques dans les logiciels CAO

Les logiciels de CAO présentement sur le marché exploitent très peu la nature technologique des caractéristiques. Le logiciel CATIA ne fait pas exception. Avec la version 4, quelques applications utilisent des caractéristiques technologiques, comme par exemple la création des soyages dans le module SHM_AERO. La version 5 se présente comme plus orientée vers l'emploi de caractéristiques mais, comme pour la version 4, l'emploi des caractéristiques est principalement lié à des emplois particuliers (tels le pliage de métal en feuille ou la mise à plat de contours de plis composites). Au niveau du modelleur solide lui-même, l'appellation « caractéristique » donnée aux fonctions de modélisation telles le *Pad* ou le *Pocket* ne sont en fait que de nouveaux contenants pour un contenu à saveur booléenne. Seule la fonction reliée à la modélisation des trous exploite vraiment le caractère technologique relié à une caractéristique en permettant d'ajouter à ceux-ci des paramètres liés à l'ébavurage ou encore au taraudage.

L'usage de liens technologiques persistants pour associer les définitions d'éléments géométriques s'avère un point intéressant à exploiter dans la méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage. Cependant, l'application de règles strictes utilisant

l'intention de conception pour la création de caractéristiques de type « poche » dans le modèle de la pièce et pour pouvoir ensuite les convertir, à l'aide d'autres règles, en caractéristique de type « ouverture » dans le modèle du gabarit de découpe s'annonce comme un défi, particulièrement dans la recherche de solutions visant à augmenter l'efficacité du procédé de conception.

3.3 La conception d'outillage

Plusieurs travaux font état de recherches dans le domaine de l'outillage. Parmi ces derniers, certains se concentrent sur des préoccupations de positionnement de brides ou de comportements des matériaux, pour proposer des configurations d'outillages plus adaptées aux problèmes de fabrication. Chou [21], par exemple, considère les efforts de coupe pour la conception d'outillage. À partir d'une décomposition de la géométrie de la pièce, il étudie les forces engendrées lors de l'usinage et propose un algorithme servant à calculer la position de brides et de locateurs, en s'appuyant sur les calculs de réactions et de moments de la mécanique statique appliqués à certains types d'usinage spécifiques tels le perçage, le fraisage et l'alésage.

Rong et al [22] présentent une stratégie utilisant des calculs semblables pour mener à une configuration automatique d'outillage d'usinage. Leur approche passe par le choix et la classification de divers organes modulaires servant à la fabrication de montages, par l'étude de contraintes paramétriques d'assemblage entre une pièce et son outillage, des analyses statiques reliées aux efforts de coupe et des analyses de rigidité et de stabilité des brides lorsque le concept proposé est accepté.

Karafillis et Boyce [23], quant à eux, se concentrent sur les déformations dues à l'élasticité d'un matériau lors d'un formage. Dans un premier article, ils se penchent sur la réaction élastique engendrée sur une pièce de métal en feuille par le procédé de formage hydrostatique. Leur approche présente une méthode de prévision des erreurs dimensionnelles relevant des caractéristiques mécaniques du matériau formé. Elle dégage certains points à considérer pour prévoir les déformations des pièces lors du formage pour ensuite déterminer les modifications à apporter au moule pour que le

résultat final soit le plus près possible de la forme désirée initialement. Dans un second article [24], ils présentent une méthodologie et un algorithme de conception basée sur les résultats inversés des calculs de déformation élastique d'un matériau lors d'un formage tridimensionnel.

De nombreux travaux [25-30] visent à automatiser la création d'outillage spécifique. Tous les efforts ont convergé vers un type particulier d'outillage : les outillages servant à retenir des pièces à l'aide de brides. Ils présentent diverses façons d'optimiser le positionnement de brides pour faire la rétention d'une pièce sans compromettre ses parcours d'usinage, tout en assurant une bonne retenue et un minimum de vibrations lors de la coupe.

Markus et al. [25] proposent des stratégies de positionnement de locateurs et de brides modulaires reposant sur des bases perforées ou rainurées et utilisant une méthode aléatoire de résolution de conflits dus aux géométries des éléments.

Subrahmanyam [26] utilise une série de calculs développés pour l'étude des forces reliées à l'usinage d'une pièce prismatique pour présenter une méthode de positionnement de locateurs et de brides utilisant le positionnement statique par six points et le calcul des forces et moments engendrés par l'usinage.

Kumar et al. [27] offrent une méthode de conception d'outillage visant à réduire l'espace de solutions menant à des concepts acceptables et ce, en combinant les principes de croisement et de mutation de la génétique à ceux des réseaux neuronaux. Le choix des meilleures solutions se base sur une table formée d'un ensemble d'indicateurs variant du type de locateur à la quantité de pièces à produire, et ce, en passant par les directions privilégiées pour le serrage et les dimensions de la pièce. Le système présenté ne permet pas seulement l'obtention d'une solution unique, mais aussi d'un ensemble de solutions acceptables, permettant ainsi certaines alternatives au concepteur.

Perremans [28] utilise une description des éléments d'outillage modulaire basée sur des caractéristiques de forme pour présenter un système expert de conception limité cependant à des configurations d'outillage faisant appel à des patrons de trous.

Kakish et al. [29] présentent une série de paramètres liés aux contraintes de la conception d'outillage ainsi qu'un échantillonnage typique des éléments couramment employés pour la mise en place des organes de positionnement des pièces dans les gabarits. Ils listent aussi les étapes généralement suivies par un concepteur lors de l'élaboration d'outillages destinés à différents types d'usinage.

Wu et al. [30] se démarquent en laissant de côté l'idée d'automatiser la conception d'outillage modulaire pour avancer un concept de système de conception d'outillage flexible personnalisé utilisant l'analyse de la structure de l'outillage pour faire le choix des éléments fonctionnels et générer des configurations pouvant s'adapter aux formes d'une famille de pièces par exemple. Les permutations et modifications de ces éléments offrent de multiples possibilités d'usage et sont considérées pour donner au concepteur la possibilité d'adapter le concept proposé.

Finalement, Cecil [31] fait une synthèse de certaines approches globales ayant été utilisées pour la conception assistée d'outillage, plus spécialisée à des applications modulaires cependant, et dégage les tendances à développer dans le domaine de la conception d'outillage. Il souligne l'importance d'engager le procédé dans la voie de l'ingénierie simultanée et pointe le besoin de développer des liaisons sans failles entre les applications CAO et FAO. Dans un article moins actuel, Hargrove et Kusiak [32] dressent un tableau plus étoffé de ces mêmes approches, décrivant plus précisément les concepts ayant été étudiés pour l'avancement de la méthodologie de résolution des problèmes de conception.

Dans tous les cas, les efforts déployés s'avèrent intéressants pour l'outillage considéré et pour les montages d'usinage, mais ne concernent pas directement le problème qui nous intéresse. Les articles cités traitent tous de l'outillage, mais aucun ne s'adresse

spécifiquement à la conception unifiée pièce-outillage ou encore à de l'outillage spécifique à l'aéronautique.

3.4 La conception unifiée

La perspective d'un système basé sur les connaissances et sur l'intention du concepteur apparaît comme une option incontournable pour aboutir à l'automatisation de certaines tâches de conception.

Dans leur article, Penoyer et al. [33] donnent leur opinion sur le futur des applications d'ingénierie à base de connaissances (*knowledge-based engineering*). Ils affirment qu'un tel système, dédié à la CAO, devrait posséder les caractéristiques suivantes : il devrait être lié à l'ingénierie, devrait cibler des représentations distinctes de connaissances et appliquer ces connaissances à des cas de problèmes spécifiques; il devrait aussi pouvoir traiter en profondeur les problèmes spécifiés sans en rester à un regard superficiel sur la situation et devrait finalement pouvoir raisonner à l'aide de règles logiques au lieu de se référer à un modèle mathématique. Ils considèrent que les prochains systèmes de CAO devraient être construits à l'aide d'une architecture ouverte pour faciliter l'intégration des systèmes basés sur la connaissance.

Quant à Park [34], il a travaillé plus spécifiquement au principe de capture de la méthodologie de planification des procédés. Il présente une approche permettant de définir la capture de l'intention de conception à travers trois phases distinctes et ce, en traitant la méthodologie de conception comme une planification de procédés plutôt que comme un ensemble de règles.

De leur côté, Nielsen et al. [35] utilisent un système de modélisation par caractéristiques pour mettre de l'avant une méthodologie permettant l'intégration d'un certain nombre de règles reflétant l'intention du concepteur. Leur système permet l'incorporation et la propagation des modifications à l'intérieur de géométries entièrement contraintes de même que sur des géométries sous ou sur-contraintes.

Les thèmes étudiés sont pertinents à certaines applications, mais rien ne touche l'intention de conception telle que nous comptons l'employer, les sujets abordés demeurant trop éloignés de notre problématique.

3.5 Approche proposée par l'équipe du LIPPS

De nombreux efforts ont été menés au Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS – à l'École de technologie supérieure) depuis quelques années pour mettre en place des outils utilisant les concepts liés aux logiciels CAO de nouvelle génération. Les aspects touchés par ces travaux sont : l'approche orientée métier, le typage fort des entités, les liens technologiques et les notions d'empreinte et de pseudo-empreinte.

3.5.1 L'approche orientée métier

De plus en plus, il devient important de donner au concepteur des outils CAO qui reflètent davantage la tâche qui doit être produite. Si un élément de structure d'aéronef doit être modélisé, on parlera d'un cadre, d'une lisse ou encore d'un soyage. D'ordinaire, les systèmes de CAO sont généralistes et répondent en grande partie aux besoins d'un grand nombre de disciplines. La création de modules orientés métier permet de capturer le savoir-faire et de dialoguer avec le concepteur à l'aide d'un vocabulaire spécifique à ses activités, porteur de signification technologique. Cette approche permet de minimiser le nombre d'interactions en laissant l'utilisateur s'exprimer à un haut niveau de sémantique, et laisse l'application s'occuper des détails. L'usage de tels modules entraîne inévitablement des gains de productivité. [11;36;37]

3.5.2 Le typage fort des entités

Le typage consiste à attribuer à un élément géométrique, ou à un ensemble de ces éléments, une définition propre à son emploi dans le contexte utilisé. Un orifice fait dans un modèle solide sera reconnu comme un trou, possédant comme attributs un diamètre et une profondeur, un lamage ou encore un taraudage. Le fait de typer les

entités d'un modèle pour en faire des caractéristiques technologiques permet de faciliter leur reconnaissance et de leur attribuer des comportements propres. [11;36;37]

3.5.3 Les liens technologiques

Les liens technologiques permettent de relier des éléments au sein d'un modèle et entre différents modèles. Les liens sont porteurs d'un savoir-faire spécialisé propre à une tâche à accomplir. Les liens technologiques de dérivation permettent d'obtenir (de dériver), en appliquant un certain savoir-faire à une entité de référence fortement typée, une nouvelle entité cible. Ces liens, persistants, permettent la propagation des changements à la suite d'une modification. [36;37]

3.5.4 L'empreinte et la pseudo-empreinte

Les concepts d'empreinte et de pseudo-empreinte sont assujettis par les notions de typage et de liens technologiques définis précédemment. À l'intérieur d'un modèle une empreinte correspond à la géométrie d'une caractéristique de référence du modèle, par exemple le contour produit par l'intersection d'une lisse avec un plan provenant de la face d'un cadre. De cette empreinte, une pseudo-empreinte sera créée en exploitant le savoir-faire formalisé par le lien technologique de dérivation. Cette pseudo-empreinte constitue la géométrie de la caractéristique cible dérivée de la caractéristique de référence. [36;37]

3.5.5 Exemples de réalisations

Plusieurs travaux menés au LIPPS s'articulent autour des concepts mentionnés. Nous en proposons quelques exemples parmi ceux qui se rapprochent du présent projet.

Liens multi-modèles en CAO – Application au rivetage en aéronautique

Dans son projet, Macabies [38] a utilisé le typage fort et les liens technologiques pour créer une application orientée métier permettant de définir des liens d'attachement entre les pièces d'un assemblage de même qu'entre la représentation solide et le dessin de chacune des pièces attachées. Tout changement apporté ensuite aux attachements peut être propagé aux représentations concernées, limitant les erreurs et les incohérences.

Application des liens multi-modèles à la conception mécanique

Giguère [11] utilise les concepts de typage fort, de liens technologiques de dérivation et du couple empreinte et pseudo-empreinte pour créer une application orientée métier traitant un cas industriel de définition des soyages et des découpes imposées par les lisses dans les cadres d'une structure d'aéronef.

Les entités typées sont une lisse et un cadre. Un lien technologique de dérivation est instancié entre une lisse et un cadre en prévision de la création du soyage et de la découpe dans le cadre. Le profil de la lisse à l'intersection du cadre correspond à l'empreinte de la caractéristique de référence. Le savoir-faire formalisé par le lien de dérivation permet de dériver, à partir de l'empreinte, la pseudo-empreinte de chacune des caractéristiques cibles, soit le soyage et la découpe sur le cadre. L'automatisation du processus réduit de près de 90% le temps de création des caractéristiques cibles.

L'exploitation du lien de dérivation persistant, lors des modifications, réduit les délais de près de 90% et élimine les possibilités d'erreur lors de la propagation des changements.

Ces deux projets (Macabies et Giguère) appliquent les concepts mentionnés à des problématiques situées à l'intérieur de l'effort de définition produit. À l'inverse, la problématique présentée ici déborde de la définition du produit pour inclure les processus de production associés.

Validation des caractéristiques d'usinage par des grammaires d'usinage attribuées.

Msaaf [39] propose aussi une approche orientée métier où il utilise les concepts de l'ingénierie simultanée, des caractéristiques, du typage fort et des liens technologiques pour prendre en compte les contraintes d'usinage en cours de conception. La validation à exécuter n'exige donc pas un modèle fini. La méthodologie proposée permet l'intégration d'une analyse d'usinage faite à partir de grammaires attribuées basées sur des modèles de machines et d'outils. L'approche utilise des caractéristiques pour assister le concepteur dans le processus de décision en lui présentant diverses alternatives de conception.

Application des liens technologiques à la conception automatique en aéronautique

Un dernier projet mené par B. Lamarche, étudiant à la maîtrise et travaillant au LIPPS, est l'exploitation des concepts présentés précédemment pour le développement d'une application orientée métier visant à automatiser la définition des poches d'allègement faites dans les panneaux de revêtement de la cellule d'un aéronaf. Cette approche se développe simultanément à ce projet et est en relation directe avec le projet présenté ici puisque l'automatisation du processus de création des poches pourra s'inspirer de la méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage à laquelle nous nous intéressons dans le présent mémoire.

3.6 Fonctionnalités de la nouvelle génération d'outils de CAO

La génération d'outils de CAO dont CATIA V4 fait partie, utilise des liens technologiques éphémères pour établir la grande majorité des relations entre ses différentes entités géométriques. On peut cependant noter quand même que certains liens technologiques persistants existent sous CATIA V4. Les fonctions SURF2 et SHM_AERO en sont des exemples.

La nouvelle génération de logiciels de CAO offre des liens technologiques persistants pour tous les éléments géométriques, le mode dessin étant habituellement exclu.

Pour les besoins de cette étude, les particularités suivantes, propres à CATIA V5, ont été explorées : les liens inter et intra-modèles de même que les mécanismes de publication.

3.6.1 Liens intra et inter-modèles

CATIA V5 permet la création de liens persistants entre les éléments géométriques d'un même modèle ou de modèles différents, ce qui favorise une propagation rapide des changements. Ces liens persistants peuvent prendre deux formes : celles des liens intra-modèle, contrôlables ou non par l'utilisateur, et celle des liens inter-modèles contrôlés entièrement par l'utilisateur.

Dans le cas des liens intra-modèle, un grand nombre de ceux-ci est automatiquement contrôlé par le logiciel lui-même, si on pense par exemple à l'accessibilité aux paramètres des différentes opérations de modélisation disponibles à la demande par le biais de l'arbre de création du modèle CAO. Cependant, certains de ces liens sont contrôlables par l'utilisateur. Une façon d'utiliser ces liens est de contrôler des paramètres [40] à l'intérieur d'un modèle. Ces derniers servent à établir des relations entre des éléments de la géométrie d'un modèle. Par exemple, on peut penser à la production d'un rectangle comportant des congés aux quatre coins, chacun d'eux étant régi par la même valeur numérique. La figure suivante illustre l'esquisse du rectangle et l'utilisation de ces paramètres symbolisés par l'ajout du signe $f_{(x)}$ à côté de la dimension touchée.

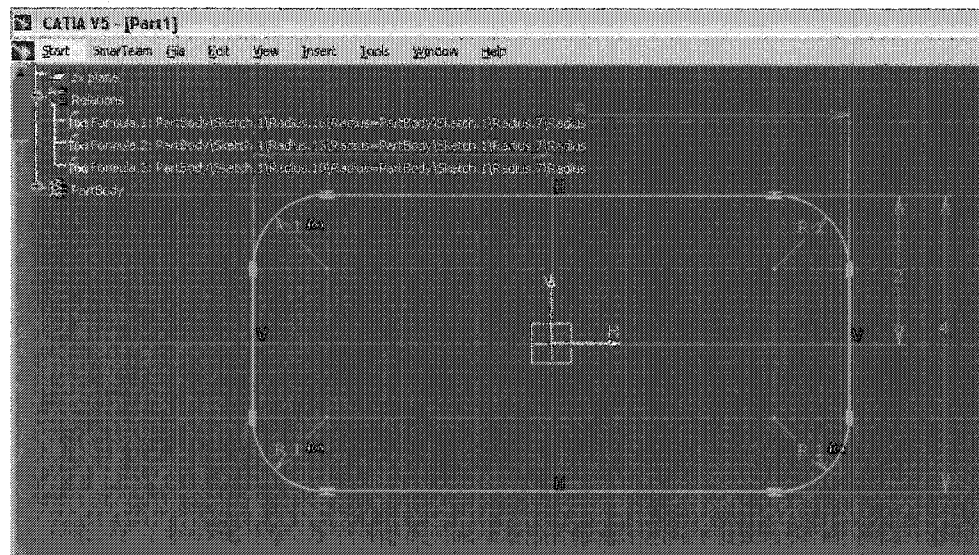


Figure 25 Exemple de paramètres

Ces paramètres, une fois créés, peuvent être utilisés pour contrôler la relation entre des entités appartenant à une même esquisse, ou à différentes esquisses. On pourrait donc récupérer la valeur du rayon d'une esquisse pour l'utiliser dans une autre.

D'autres exemples d'utilisation de ces liens sont les applications de *PowerCopy* [41], *Rules* [42] et de *Laws* [43]. Dans le cas de *PowerCopy*, il est possible de faire la duplication de géométrie en appliquant certaines règles de conception au résultat désiré. *Rules* permet d'établir des règles de conception à l'aide de bornes d'utilisation d'un certain paramètre. Par exemple, si on réfère à l'exemple du rectangle précédent, on pourrait créer une règle régissant l'emploi de valeurs de congés bornées entre .875 et 1.125 pouce. Ainsi, lorsque la valeur serait portée à .75 pouce par exemple, un message apparaîtrait à l'utilisateur pour l'aviser qu'il ne respecte pas la règle établie. La fonction *Laws* permettra de créer des liens entre divers types de paramètres. Si par exemple lors d'une animation cinématique, il est désiré d'entrer une fonction impliquant un calcul de vitesse, il sera possible de créer une loi liant un déplacement (linéaire ou angulaire) à une variable de temps. Le choix des valeurs utilisées pour chaque paramètre permettra l'obtention de la vitesse recherchée.

Le logiciel offre aussi la possibilité d'utiliser des liens technologiques à travers des fichiers différents [44]. On parlera alors de liens inter-modèles. Il est donc possible ici de récupérer dans un fichier cible les paramètres établis dans un fichier source pour pouvoir les appliquer à de nouvelles géométries. On lierait alors les deux fichiers et on faciliterait du même coup la réaction faite à un changement du modèle source puisque la propagation de la modification serait assurée par les liens. Les liens inter-modèles sont totalement sous le contrôle de l'utilisateur.

3.6.2 Publication

La publication [45] est un excellent exemple de mécanisme d'exposition des éléments devant être liés par un lien. CATIA V5 permet à un usager travaillant en contexte de s'appuyer sur la géométrie d'un premier modèle pour créer de la nouvelle géométrie dans un second modèle et de faciliter le remplacement du premier modèle dans la maquette sans avoir à recréer les liens établis entre les deux modèles originaux. Cependant, avec les réglages par défaut du logiciel, les nouveaux éléments créés ne sont pas unis aux éléments de référence par des liens persistants, mais bien par des liens éphémères. Le mécanisme alors employé par le logiciel est de reproduire la géométrie du modèle de référence dans le modèle cible et de la placer dans l'espace *No-Show*. Si une modification est nécessaire dans le modèle de référence, le modèle cible ne bénéficie pas de la propagation automatique du changement, l'entité placée en *No-Show* demeurant inerte. Le mécanisme de publication permet donc de contrôler quels éléments géométriques seront disponibles comme empreinte, pour éventuellement générer des pseudo-empreintes via des liens technologiques et de transférer ces liens d'un modèle à un autre. À l'aide d'un certain nombre de réglages disponibles à l'utilisateur, il est ainsi possible de publier les éléments d'un modèle, de ne permettre des liens inter-modèles que sur des éléments publiés, etc.

3.7 Synthèse

L'application étudiée dans ce mémoire est celle de la conception d'outillage de découpe pour le revêtement protecteur des pièces devant être usinées chimiquement. Ces

outillages sont définis à partir d'un ensemble de règles formalisées, spécifiques à cette conception et relèvent directement de la géométrie de la pièce finie.

La littérature a permis de dégager du domaine des caractéristiques les notions de conception par caractéristiques et de conversions de caractéristiques, notions qui sont intimement liées à notre problème.

La recherche bibliographique orientée vers le domaine de la conception d'outillage a montré que les travaux présentés se regroupaient principalement dans les domaines suivants : le calcul de positions de brides, les considérations de déformation élastiques et la définition de caractéristiques de modélisations orientées vers une reconnaissance en aval dans le procédé d'usinage.

Le calcul de positions de brides se basait sur la géométrie de la pièce ou les efforts de coupe produits lors de l'usinage pour élaborer une structure de positionnement des divers éléments d'attache et de localisation; les considérations de déformations élastiques de pièces de métal en feuille face au formage traitaient beaucoup plus de comportement élastique du matériau que de la conception de l'outillage de formage lui-même; et finalement, l'usage des caractéristiques présentait principalement l'idée de la conversion des caractéristiques vers l'application d'usinage, usage un peu distant de l'application des caractéristiques que l'on compte exploiter dans l'idée de méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage.

Pour ce qui est de l'usinage chimique en soi, les recherches ont montré que les quelques articles disponibles traitaient principalement de :

- résultats du procédé chimique sur quelques matériaux, métalliques ou non;
- préparation d'agents plus environnementaux;
- amélioration des états de surfaces.

Il n'a pas été retracé de littérature traitant de l'intégration de la CAO dans les techniques de définition d'outillage destiné à l'usinage chimique.

Cependant, plusieurs des concepts mis de l'avant dans les travaux menés au LIPPS, soit ceux de lien technologique de dérivation, de typage fort des entités et du couple empreinte/pseudo-empreinte, peuvent être intégrés à une solution de notre problématique. Par ailleurs, les logiciels de CAO de nouvelle génération, notamment CATIA V5, offrent des mécanismes de gestion de liens persistants et de publication des éléments caractéristiques qui seront mis à contribution pour solutionner le problème de structuration du modèle pièce en vue de son unification avec le modèle outillage.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION UNIFIÉE DES TÔLES ET DES GABARITS DE DÉCOUPE

4.1 Mise en situation

La méthodologie actuelle, documentée chez Bombardier aéronautique, est basée sur l'usage d'un outil de CAO en fin de carrière exploitant des liens technologiques éphémères pour l'établissement d'une grande partie des relations entre ses entités. Cela implique que tout changement de géométrie de la pièce devant être usinée chimiquement amènera une intervention manuelle pour la mise à jour de l'outillage. La démarche de conception d'outillage devra donc être reprise, partiellement ou intégralement, pour parvenir à un nouvel outillage modifié. Il n'y a pas de mécanisme automatique de propagation de modification.

Dans un contexte où CATIA V5 (logiciel offrant un usage plus généralisé des liens technologiques persistants) sera employé, le travail de modification sera simplifié. Par contre, il est possible que ce gain demande un investissement initial en temps de modélisation, lors de la création de la géométrie des contours des poches sur la pièce et son outillage. La gestion des liens technologiques est une tâche demandant plus de ressources au logiciel CAO. L'établissement de l'historique, la création des éléments enfants à partir des parents, le déplacement des éléments parents dans un espace *No-Show* lorsque des enfants sont créés, l'identification de tous les éléments et leur gestion fait en sorte que pour une même tâche, l'utilisation de CATIA V5 par rapport à CATIA V4 demande plus de temps.

Dans le procédé qui nous intéresse, il est nécessaire de reproduire la démarche de conception de pièces pour pouvoir évaluer correctement l'impact d'une structuration adéquate du modèle pièce sur la création du modèle outillage. Pour pouvoir comparer le coût relatif de la préparation d'un modèle CAO pour une pièce et son gabarit de découpe à l'aide des deux logiciels, des scénarios semblables ont été réalisés dans

chacun des logiciels. Trois pièces représentatives des principales familles présentées précédemment ont donc été modélisées : un panneau de revêtement à simple courbure, un panneau de revêtement à double courbure et une pièce avec poche unique à contour complexe. Ces trois pièces sont représentatives d'environ 75% du volume de pièces usinées chimiquement chez Bombardier et possèdent une méthodologie de modélisation relativement semblable à celle des deux autres familles qui demandent l'usage de détails techniques pour la création des onglets de retenue (*tabs*), détails détachés de la géométrie directe des poches.

L'objectif du travail étant de quantifier le gain qu'apporte l'usage d'un logiciel de CAO utilisant des liens technologiques persistants plutôt qu'éphémères dans la définition de ses éléments, l'emphasis du travail a été mise sur l'ensemble des opérations manuelles et répétitives faites par un concepteur lors de la définition de la géométrie des poches d'une pièce et des ouvertures d'un outillage. Ainsi, certaines opérations ont été laissées de côté. On pense ici, par exemple, au positionnement et à la modélisation des trous d'outillage, à l'ajout de matière supplémentaire pour faire la fabrication du panneau par étirement, à l'ajout d'onglets de support (*tabs*) supplémentaires, etc. La démarche fut donc simplifiée pour ne garder que l'essentiel du procédé traitant de la manipulation des entités menant à la définition des poches et des ouvertures par l'utilisateur. Cela permet de mesurer l'impact du passage d'un logiciel à un autre, donc de l'usage des liens technologiques persistants plutôt qu'éphémères.

4.2 Conditions de départ

Certaines conditions de départ ont été prévues pour les différents tests de manière à cibler l'essentiel de la méthodologie sur la production des géométries liées aux poches et à l'outillage. Avant de présenter ces conditions de départ, une clarification terminologique est requise.

La production de toute pièce reliée à la cellule d'un appareil se base sur les formes déterminées pour l'aérodynamisme de l'aéronef. Ces surfaces, qui correspondent à la surface de l'appareil, sont connues sous l'acronyme OML – *Outside Mold Line*. Ces

formes sont utilisées pour les simulations aérodynamiques, mais ne sont pas celles sur lesquelles s'appuie directement la géométrie se trouvant à l'intérieur de l'appareil. D'autres surfaces doivent être obtenues par décalage à partir des éléments de référence définis comme OML. Ces nouveaux éléments, distants de leur référence aérodynamique de l'épaisseur de la paroi qui les sépare, sont appelés IML – *Inside Mold Line*.

La démarche industrielle demanderait à un concepteur ayant à modéliser un élément de structure, d'identifier le fichier définissant l'OML pour la région désirée, de récupérer ce fichier de la base de données de l'ingénierie et de créer une nouvelle surface de travail, celle définie comme IML, dans le fichier qui servira à la modélisation de l'élément de structure. Dans ce travail, nous identifierons la surface de travail : surface de référence - IML.

Les conditions de départ assumées pour la modélisation de la tôle sont les suivantes :

- 1) Présence de la surface de référence - IML dans le modèle de départ de la tôle. Pour les tests, cette surface sert de référence à la création de la tôle puisque c'est sur elle que s'appuient simultanément la tôle de revêtement et le gabarit de découpe;
- 2) Définition des formes de lisses et des cadres;

Les lisses utilisées pour rigidifier la cellule sont des éléments faits d'aluminium extrudé. Dans le plus simple des cas, celui d'une section d'appareil utilisant une tôle de revêtement à simple courbure, ces lisses sont utilisées sans formage préalable.

La tôle de revêtement possède un rayon de courbure qui n'est pas nécessairement le même que celui de la base de la lisse. Celui de la lisse est géré par la contrainte mécanique de la buse d'extrusion alors que celui de la tôle est régi par la configuration de l'appareil.

En situation réelle, il existe un faible espacement entre la lisse et la tôle de revêtement, tel qu'illustré à la figure 26. Cependant, à cause de la flexibilité du panneau de revêtement et de l'emploi de nombreux rivets, les deux formes s'épouseront à l'assemblage, sans pour autant compromettre la résistance mécanique de la structure.

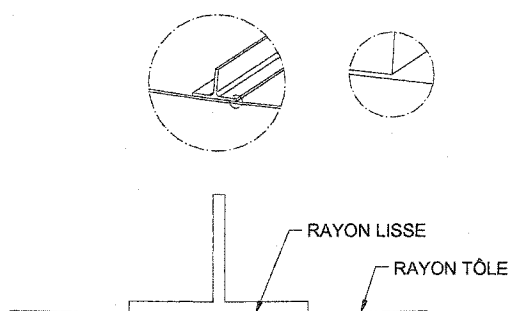


Figure 26 Décalage lisse - tôle

Pour le concepteur, cette situation se traduit par la création de géométries supplémentaires, sous forme de plans de références et de courbes d'intersection, pour parvenir à établir les limites de la projection des lisses sur la surface interne de la tôle.

Cet aspect de la création de la géométrie ne sera pas traité. Le travail à faire étant le même dans CATIA V4 et CATIA V5, le décompte du temps nécessaire à l'effectuer n'aura pas d'impact important sur la comparaison désirée. Les modèles employés seront donc adaptés à une situation de validation et non à une situation industrielle.

3) Extraction des courbes d'intersection entre la structure et l'IML;

Les courbes d'intersection lisse - IML et cadres - IML sont des éléments de référence importants à la définition du contour des poches dans la tôle puisque

c'est à partir d'elles que se calcule la position des limites du contour de la poche en fonction d'un décalage prescrit par les règles de conception. Ces courbes, illustrées à la figure 27, seront extraites dans les modèles des lisses et des cadres pour la modélisation des tôles de revêtement faites de surfaces à simple et à double courbure. L'extraction de ces courbes dans chacun des modèles instanciés permettra une économie de temps et une gestion de géométrie plus simple dans la maquette.

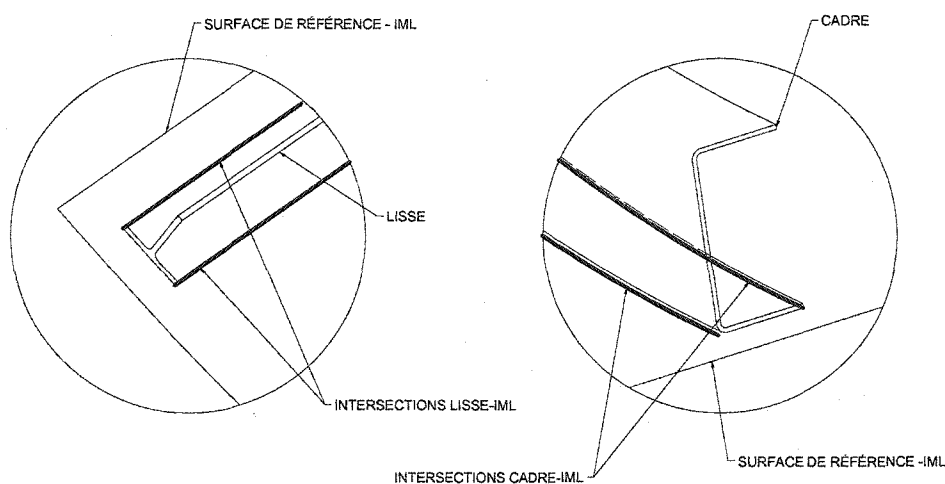


Figure 27 Courbes d'intersections structure - surface de référence - IML

4) Production de courbes de référence pour découpe;

Une courbe de référence pour découpe est déjà produite dans chacun des modèles de lisses et de cadres, comme illustré à la figure 28.

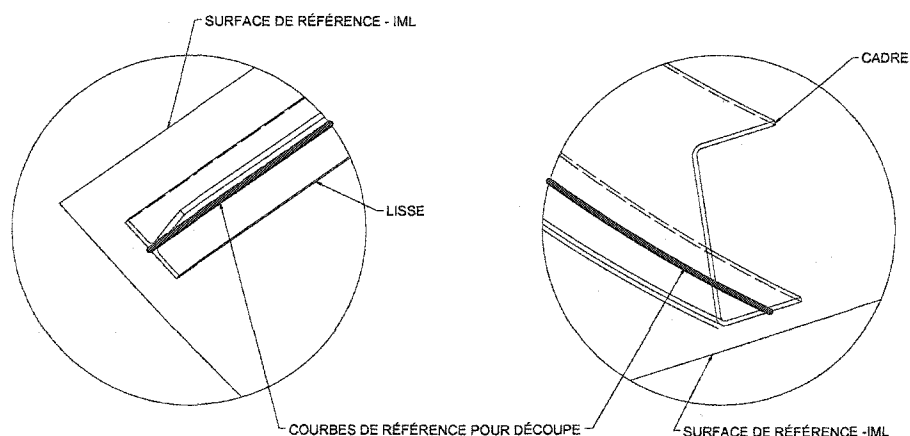


Figure 28 Courbes de référence pour découpe

Ces courbes serviront à découper les différentes courbes parallèles géodésiques obtenues en segments. Ces segments sont utilisés par la suite pour définir les contours des poches dans la tôle, et des ouvertures dans le gabarit de découpe. On peut voir la position de ces courbes de découpe par rapport aux courbes parallèles géodésiques à la figure 29.

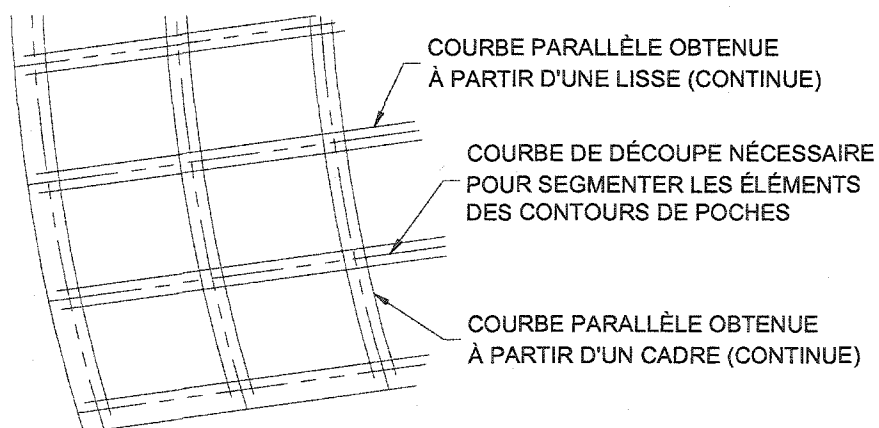


Figure 29 Courbes de découpe

5) Coloration des courbes de références;

De manière à faciliter la reconnaissance et la sélection des différentes courbes de références, ces dernières ont été colorées de façon distinctive. Les courbes d'intersections cadres-IML ont été colorées en jaune, celles définissant les intersections lisses-IML, en bleu, et finalement, les courbes de références pour découpe, en rouge.

Les conditions de départ posées sont identiques pour les tests effectués avec CATIA V4 et CATIA V5. Elles servent à produire une structure adéquate pour les modèles de pièces qui constitue les contextes des tôles de revêtement qui nous intéressent. On rappellera cependant que les liens technologiques qui assurent la cohésion des assemblages sous CATIA V4 sont éphémères alors que ces mêmes liens, sous CATIA V5, sont persistants. Il s'agit donc de conditions de départ favorables à CATIA V5 qui ne reflètent en rien la pratique actuelle sous CATIA V4.

6) Congé au fond des poches

Lors de l'usinage chimique, l'érosion laisse un congé dans le fond de toute poche créée. Lors du stage effectué chez Bombardier Aéronautique, il a été mentionné que la modélisation de ce congé dans le modèle solide était laissée à la discrétion de l'utilisateur et que, généralement, elle n'était pas faite. Aucun congé n'a été modélisé dans les pièces ayant servi aux tests.

Les tests effectués se limiteront donc à la modélisation solide de modèles comportant des poches et des ouvertures uniquement. Ceci ne compromet en rien l'application industrielle qui nous intéresse.

4.3 Approches de modélisation

Trois approches distinctes ont été employées pour modéliser les tôles et les gabarits de découpe : la soustraction, le laminage et l'épaississement. Ces approches sont expliquées dans les lignes qui suivent.

4.3.1 Soustraction

Cette première approche demande une opération booléenne de soustraction entre un premier solide représentant la tôle telle que formée, et un groupe de solides représentant l'ensemble des poches ou des ouvertures à produire. La figure 30 présente l'approche pour une tôle de revêtement à simple courbure.

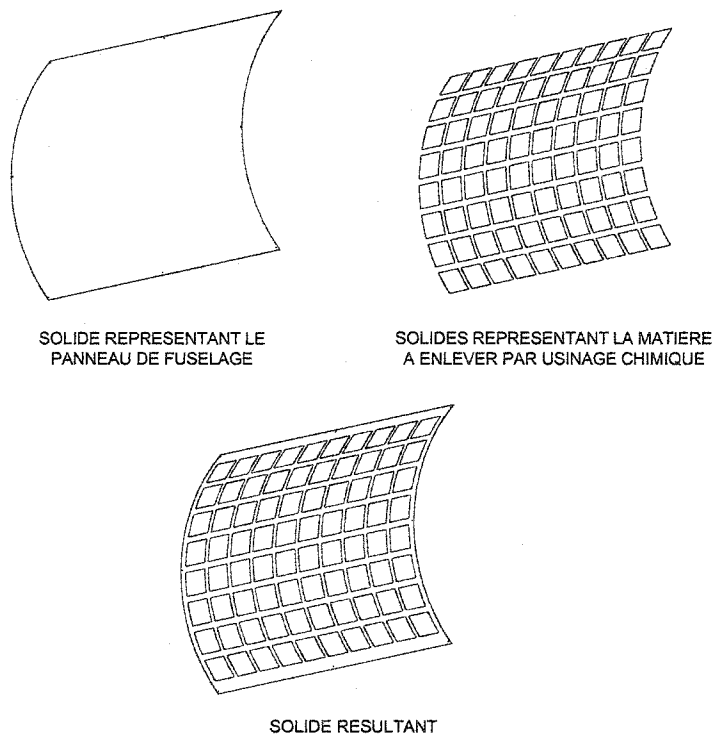


Figure 30 Modélisation par soustraction

4.3.2 Laminage

L'approche de laminage consiste à créer un modèle solide en deux parties, à partir des éléments surfaciques nécessaires à sa définition. Dans un premier temps, un solide est produit à partir de la surface de référence - IML. Ce solide est monolithique et a une épaisseur correspondant à l'épaisseur de la tôle qui ne sera pas touchée lors de l'attaque chimique. Ensuite, un deuxième solide est produit à l'aide d'un autre élément surfacique correspondant à la surface de référence - IML, mais découpé cette fois-ci par tous les contours servant à la définition des poches. L'épaisseur de ce second solide correspond à la profondeur des poches à produire. Par exemple, si une tôle de .060 pouce d'épaisseur doit comporter des poches ayant une profondeur de .040 pouce, le solide monolithique aura une épaisseur de .020 pouce tandis que celle du solide perforé sera de .040 pouce. Les deux solides seront joints pour produire le modèle du panneau. La figure 31 présente l'approche pour une tôle de revêtement à simple courbure.

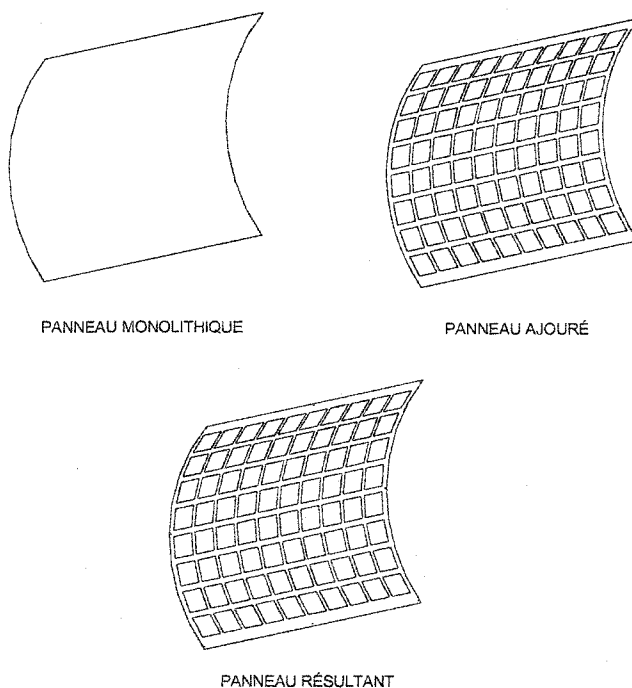


Figure 31 Modélisation par laminage

4.3.3 Épaississement

L'approche par épaississement est une variante de l'approche par laminage. Elle est dédiée plus spécialement à la production du modèle du gabarit de découpe étant donné qu'elle ne requiert qu'un seul solide. Le gabarit se présente comme un solide perforé de toutes les ouvertures nécessaires au passage du couteau servant à découper le revêtement protecteur, et peut donc être modélisé comme un solide unique produit par l'épaississement d'un élément surfacique correspondant à la surface de référence - IML, mais découpé cette fois-ci par tous les contours servant à la définition des ouvertures. Un tel modèle est présenté à la figure 32.

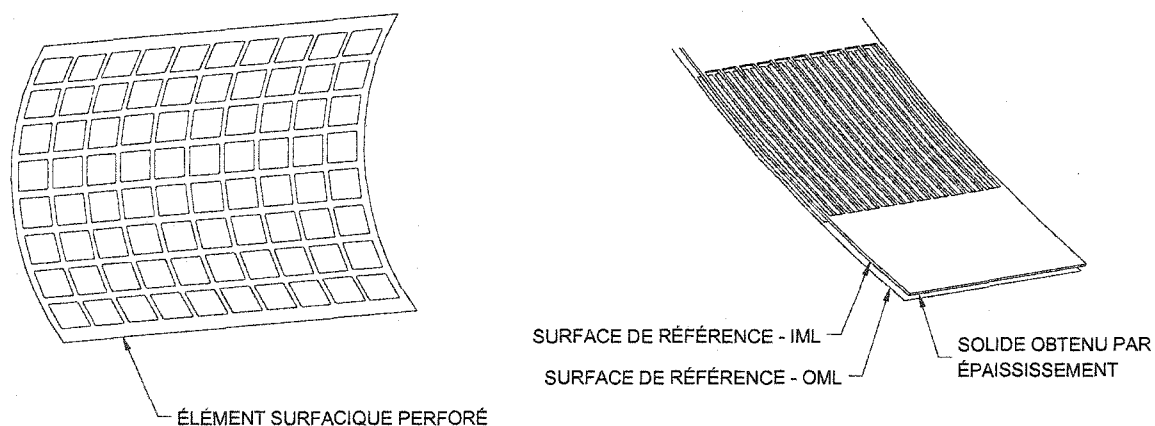


Figure 32 Modélisation par épaississement

Voyons maintenant comment ces différentes approches peuvent être utilisées pour la modélisation qui nous intéresse. Cette démarche sera effectuée en exploitant des liens technologiques persistants favorisant la modélisation unifiée des tôles et de leur outillage.

4.4 Application des approches pour la tôle de revêtement

En considérant les approches de modélisation présentées précédemment, les tôles de revêtement peuvent être modélisées selon la méthode utilisant la soustraction et celle utilisant le laminage, peu importe que l'outil de CAO employé offre des liens technologiques éphémères ou persistants.

Des échantillons des deux familles de pièces ont été modélisés : celle des tôles de revêtement comportant un grand nombre de poches à épaisseur uniforme et celle des tôles possédant peu de poches, mais des contours plus complexes.

4.4.1 Modélisation avec liens technologiques éphémères

Sous CATIA V4, les étapes de création pour la première famille, celles des tôles à multiples poches d'épaisseur uniforme, sont les suivantes :

- 1) Ouverture du modèle de la tôle de revêtement;
- 2) Ouverture des modèles de lisses et de cadres en mode passif;
- 3) Copie des courbes d'intersection et de découpe des modèles de lisses et de cadres dans le modèle de la tôle;
- 4) Sauvegarde du modèle de la tôle;
- 5) Fermeture de tous les fichiers passifs. Conservation du modèle de la tôle de revêtement en mode *Single* pour optimiser l'usage de la mémoire;
- 6) Projection des courbes provenant des lisses et des cadres sur la surface de référence – IML pour recréer des liens entre les entités;
- 7) Changement de la couleur par défaut de création des nouveaux éléments pour en faciliter la reconnaissance;
- 8) Création des copies parallèles géodésiques des courbes projetées pour définir les limites de la poche (.100 pouce);
- 9) Sélection par couleur et envoi des courbes projetées dans l'espace *No-Show* pour faciliter la sélection ultérieure et limiter les erreurs;

- 10) Découpe des courbes parallèles en segments, à partir des courbes de référence pour découpes, pour délimiter chacune des poches;
- 11) Création des congés de raccordement géodésiques, avec une valeur de 0.5 pouce sur les segments de courbes pour créer les contours de poches;
- 12) Création de la pièce solide. À cette étape, les deux approches de modélisation ont été employées.

A) Première approche – Soustraction;

- i) Création d'une face pour chacune des poches, faite à partir de la surface de référence - IML et de chacun des contours de poche;
- ii) Création d'un premier solide à partir de la surface de référence - IML. Ce solide possède une épaisseur équivalente à l'épaisseur maximale de la pièce finie;
- iii) Création de solides pour chacune des poches à partir des faces produites précédemment. Ces solides possèdent l'épaisseur de la quantité de matière à enlever par usinage chimique;
- iv) Union des solides des poches de manière à conserver une structure à arborescence large;
- v) Soustraction du solide résultant de l'union de toutes les poches du solide correspondant à la pièce non-usinée;
- vi) Sauvegarde du fichier.

B) Seconde approche – Laminage;

- i) Création d'une face perforée faite à partir de la surface de référence - IML et de tous les contours de poches. Après la sélection de la surface, envoyer cette dernière dans l'espace *No-Show* pour éviter des erreurs lors de la sélection des contours des poches;
- ii) Création d'un premier solide à partir de la surface de référence - IML. Ce solide possède une épaisseur équivalente à la matière non usinée

chimiquement de la pièce finie. Par conséquent il est nécessaire d'utiliser deux paramètres d'épaisseur à sa définition;

- iii) Création d'un second solide à partir de la face produite précédemment. Ce solide possède une épaisseur équivalente à la profondeur des poches;
- iv) Union des deux solides;
- v) Sauvegarde du fichier.

Pour la deuxième famille de pièces, celle des tôles caractérisées par des poches à géométrie complexe, les étapes de modélisation sont très semblables. Les distinctions proviennent du fait qu'au lieu de récupérer la grande partie de la géométrie de référence des éléments contextuels, il sera nécessaire de créer directement ces éléments en fonction des besoins géométriques. Dans le cas du modèle expérimenté, les étapes nécessaires sont :

- 1) Ouverture du modèle de la tôle de revêtement;
- 2) Création des plans de référence nécessaires;
- 3) Création des courbes d'intersection plans-surface de référence - IML;
- 4) Création des courbes parallèles géodésiques sur la surface de référence – IML;
- 5) Découpe des courbes en segments;
- 6) Création des congés de raccordement géodésiques sur les segments de courbes pour créer les contours de poches;
- 7) Création de la pièce solide. À cette étape, les approches de soustraction et de laminage sont utilisées telles que définies pour les pièces de la famille précédente.

4.4.2 Modélisation avec liens technologiques persistants

La nouvelle génération de logiciels de CAO permettant l'emploi généralisé de liens technologiques persistants ouvre la possibilité d'établir diverses relations entre des éléments. La mise à profit de ces liens demande une démarche de création quelque peu différente de celle utilisée sous CATIA V4.

Sous CATIA V5, les étapes de création de la pièce pour la première famille de tôles sont les suivantes :

- 1) Création d'un nouveau produit. Y insérer le modèle de la tôle de revêtement contenant déjà la surface de référence - IML, les modèles des cadres et des lisses nécessaires à la mise en place du contexte;
- 2) Création des courbes parallèles sur la surface à une distance de .100 pouce à partir des courbes publiées représentant l'intersection de chacune des pièces avec la surface de référence - IML;
- 3) Découpage des éléments nouvellement créés avec les courbes de référence pour découpe afin de les segmenter, pour bien définir les limites de chacune des poches;
- 4) Création de la géométrie de support (points) pour procéder à une nouvelle découpe de l'un des contours de chaque poche, dans le but de contourner une limitation du logiciel quant à l'ajout de congés dans les coins. L'emplacement de ces points est arbitraire, en autant qu'on en retrouve un pour chacun des contours. La figure 33 présente la configuration employée pour la manipulation;

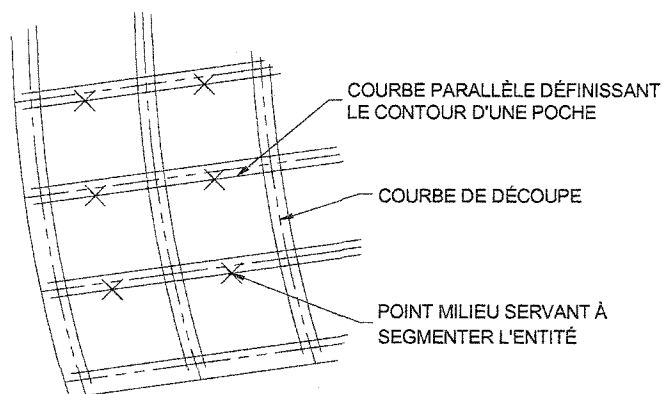


Figure 33 Configuration de points

- 5) Production des nouvelles découpes des contours;
- 6) Création de tous les congés à une valeur de rayon de .5 pouce;

- 7) Identification de tous les contours selon un ordre précis pour mieux les localiser plus tard. Ici, les contours ont été identifiés du haut vers le bas et de la gauche vers la droite, comme illustré à la figure 34. Les contours des poches portent des noms de type PXX;

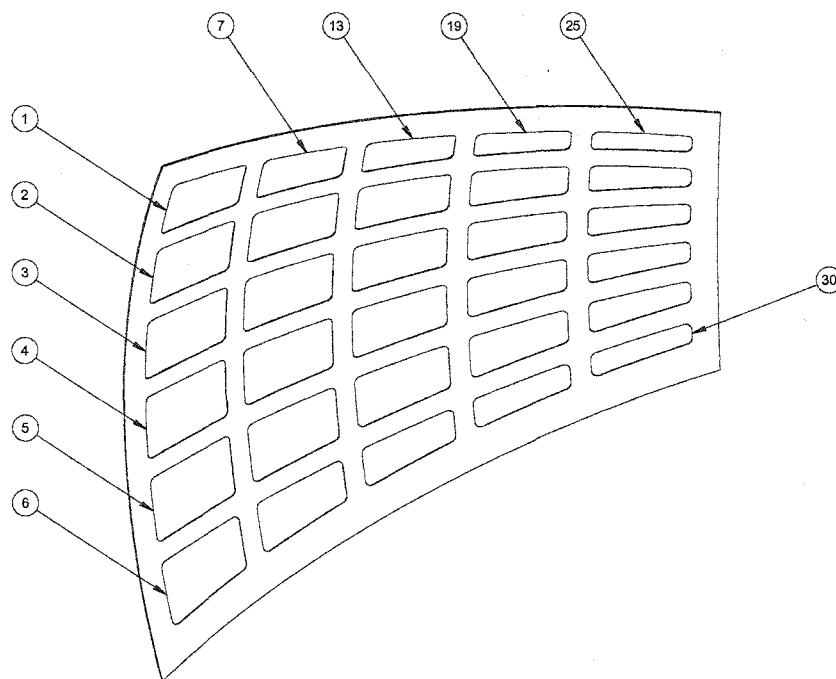


Figure 34 Ordre d'identification des contours

- 8) Publication des contours;
 9) Sauvegarde du fichier;
 10) Création de la pièce solide. À cette étape, les deux approches de modélisation ont été employées.

A) Première approche – Soustraction;

- i) Création de portions de surface pour les poches. Ces nouvelles surfaces sont faites à partir de la surface de référence - IML et des éléments des contours produits précédemment;

- ii) Création d'un premier solide à partir de la surface de référence - IML. Ce solide possède une épaisseur équivalente à l'épaisseur de la pièce finie et est fait dans le corps principal du modèle;
- iii) Création d'un second corps de pièce;
- iv) Création, dans le second corps de pièce, d'un solide correspondant au volume de matière érodée pour chacune des poches du panneau de revêtement. Ces solides sont automatiquement unis entre eux au moment de leur création;
- v) Soustraction du second corps de pièce à partir du premier pour obtenir le modèle final;
- vi) Sauvegarde du fichier.

B) Seconde approche – Laminage;

- i) Création d'une surface ajourée faite à partir de la surface de référence - IML et de tous les contours de poches;
- ii) Création d'un premier solide à partir de la surface de référence - IML. Ce solide possède une épaisseur équivalente à la matière non usinée chimiquement de la pièce finie. Ce solide est produit dans le corps principal du modèle;
- iii) Création d'un second solide à partir de la surface ajourée produite précédemment. Ce deuxième solide s'ajoute automatiquement au solide précédent pour ne former qu'un objet dans le corps principal du modèle;
- iv) Sauvegarde du fichier.

Les étapes de la modélisation de la pièce de la seconde famille, à l'aide de CATIA V5, ne seront pas énumérées ici. Ces étapes s'inspirent de celles déjà énumérées pour la création des pièces de la première famille ainsi que des particularités énoncées lors de la présentation des étapes nécessaires à la pièce de la seconde famille à l'aide de CATIA V4. En bref, il s'agit d'y produire les éléments géométriques nécessaires à la définition du contour de la poche avant d'utiliser la même approche que présentée précédemment.

4.5 Application des approches pour le gabarit de découpe

Les approches employées pour la modélisation des gabarits de découpe sont celles de la soustraction et celle de l'épaississement. En effet, la méthode de laminage n'est plus nécessaire ici, étant donné qu'il est possible de produire le modèle du gabarit de découpe en une seule opération, créant ainsi immédiatement toutes les ouvertures.

4.5.1 Modélisation avec liens technologiques éphémères

Les méthodes de modélisation utilisées pour les gabarits sont pratiquement les mêmes que pour les tôles lorsque CATIA V4 est employé. Puisqu'il n'y a pas de liens technologiques persistants entre les éléments nécessaires à la définition géométrique, il n'est pas requis de transférer les éléments du modèle de la tôle au modèle de l'outillage pour en récupérer le nécessaire. La démarche actuelle demande plutôt de sauvegarder le modèle de la tôle sous le nom qui sera donné à l'outillage avant de l'épurer des éléments non-nécessaires. Une fois la géométrie de référence disponible, les copies parallèles géodésiques des courbes du contour sont faites pour définir le contour des ouvertures du gabarit de découpe. La distance utilisée pour ces copies est régie par des règles de conception, qui ont été simplifiées en employant une valeur uniforme de .0625 pouce.

Une fois les contours des ouvertures définis, la production du modèle solide pourra prendre l'approche booléenne de soustraction, identique à celle utilisée dans le modèle de la tôle ou encore l'approche de l'épaississement. Dans ce dernier cas, une face sera produite à partir de la surface de référence – IML et des contours des ouvertures. Cette face sera épaissie pour produire le solide.

4.5.2 Modélisation avec liens technologiques persistants

Pour la production de l'outillage de découpe à l'aide de CATIA V5, la méthodologie de modélisation sera différente de celle sous CATIA V4, puisque le nouvel outil de CAO permet un emploi très intéressant des liens technologiques persistants entre les fichiers

des tôles et de leur outillage. Cet emploi de liens amènera donc, à la tâche de conception d'outillage, des concepts d'association et d'unification qui n'étaient pas relevés par le passé. En effet, à partir du moment où des liens technologiques persistants existent entre le modèle d'une pièce et celui de son outillage, les deux modèles restent associés et permettent la propagation de tout changement apporté au modèle de la pièce à sa contrepartie outillage. En revanche, pour que cette association soit efficace, il est primordial d'unifier la méthodologie de conception de façon stricte et adéquate pour assurer la cohérence des liens.

Une hypothèse nécessaire à poser, cependant, est celle qui consiste à limiter la modélisation des gabarits aux cas où un nouvel outillage est créé, ce qui implique que toute adaptation d'outillage sera écartée. Une modification d'outillage est en effet possible en pensant à récupérer la définition d'un premier outil et de transférer les liens persistants qui proviennent de sa pièce d'origine à une autre pièce. Ce cas, quoique possible, n'a pas été expérimenté dans les tests mais pourrait s'avérer plus long qu'une nouvelle création étant donné la lourde structure des liens à gérer ; surtout dans l'éventualité où un mécanisme de création automatique de l'outillage est disponible.

Avec une préparation adéquate du modèle de la tôle (préparation qui exige l'identification et la publication de la surface de référence – IML et des éléments définissant les contours des poches) le concepteur d'outillage sera en mesure de procéder à la modélisation du gabarit sans avoir à redéfinir entièrement toute la géométrie nécessaire à la définition des ouvertures. Par la voie de la publication, il sera en mesure de récupérer la géométrie du modèle de la tôle (l'empreinte) sous forme de référence externe au fichier de sa pièce, et de l'utiliser pour produire sa propre géométrie, sans avoir à l'intégrer à son modèle. Ce lien technologique persistant aura pour effet de permettre une propagation des changements à travers les modèles, par la simple mise à jour des fichiers.

La modélisation des gabarits de découpe, pour les tôles des deux familles, passe par les mêmes étapes, soient :

- 1) Création d'un produit;
- 2) Insertion du modèle du panneau (tôle) de revêtement dans lequel se trouvent publiés la surface de référence - IML et les contours de chacune des poches;
- 3) Insertion d'un nouveau modèle pour le futur outillage;
- 4) Activation du modèle de l'outillage;
- 5) Création d'une courbe parallèle géodésique (la pseudo-empreinte) sur la surface de référence, à une distance de .0625 pouce vers le centre de la poche, à partir de chacune des courbes de contours publiées des poches;
- 6) Identification des contours des ouvertures de l'outillage sous la forme TXX;
- 7) Sauvegarde du fichier;
- 8) Création de la pièce solide. À cette étape, les deux approches de modélisation peuvent être employées.

A) Première approche – Soustraction;

- i) Création de portions de surface pour les ouvertures. Ces entités sont faites à partir de la surface de référence - IML et des éléments des contours des ouvertures produits précédemment;
- ii) Création d'un premier solide à partir de la surface de référence - IML. Ce solide est fait dans le corps principal du modèle et possède une épaisseur équivalente à l'épaisseur de la pièce finie;
- iii) Création d'un second corps de pièce;
- iv) Création de solides pour les ouvertures, dans le deuxième corps de pièce, à partir des portions de surfaces produites précédemment. Ces solides possèdent une épaisseur égale ou supérieure à celle du premier solide;
- v) Soustraction du deuxième corps de pièce à partir du premier;
- vi) Sauvegarde du fichier.

B) Seconde approche – Épaississement.

- i) Création d'une nouvelle surface perforée faite à partir de la surface de référence - IML et des contours des ouvertures;
- ii) Création d'un solide à partir de cette face. Ce solide possède une épaisseur équivalente à la pièce finie;
- iii) Sauvegarde du fichier.

4.6 Étude de cas de modifications

Les avantages offerts par l'emploi de liens technologiques persistants se matérialisent lors de la propagation des modifications.

Ainsi, une étude visant à mesurer les gains de la modélisation unifiée d'une pièce et de son outillage, à l'aide d'une nouvelle génération d'outils de CAO, ne peut être complète sans une simulation de modification.

Les modifications présentées reproduisent des situations rencontrées en entreprise aéronautique. Les scénarios considérés constituent bien sûr un sous-ensemble de tous les cas possibles. Cela n'enlève cependant rien à la validité des résultats obtenus. Les mises à jour des pièces utilisées pour ces manipulations sont facilitées par la façon dont les liens technologiques sont structurés au sein des modèles de pièce et d'outillage. La propagation de modification pourrait être de beaucoup compromise, si cette structure n'est pas suivie; les problèmes de reconnaissance de cycles en sont un exemple.

Les modifications simulées lors des tests ont des impacts majeurs sur la géométrie des tôles de revêtement. Étant donnée la nature éphémère des liens technologiques utilisés par CATIA V4, il n'a pas été jugé pertinent de procéder à une simulation de modification, cette dernière entraînant pratiquement une nouvelle modélisation de la pièce avec, par conséquent, des résultats proches de ceux obtenus lors de la modélisation initiale de la pièce.

4.6.1 Pièce à poche unique complexe

Pour cette pièce faisant partie de la seconde famille évaluée, une modification sera apportée à la courbe génératrice de la surface. Puisque tout le contour est produit à l'aide de courbes parallèles déportées sur cette surface, la modification a un impact sur toute la définition du contour de la poche.

La figure 35 présente les modèles de la pièce à poche unique et de son gabarit de découpe avant modification.

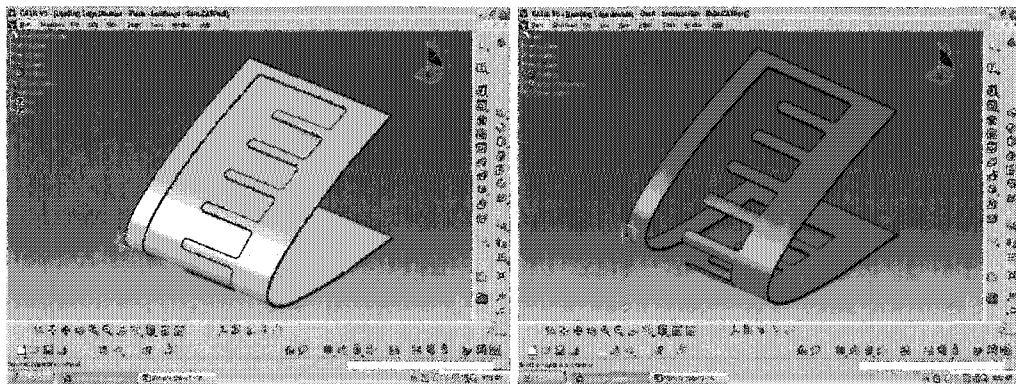


Figure 35 Tôle et gabarit de découpe avant modification

Comme il a été mentionné précédemment, la modification de la tôle à poche unique consistait à modifier la surface sur laquelle le contour de la poche était produit. Ce changement a été fait en modifiant la position d'un point de contrôle de la courbe génératrice de la surface, comme on peut le voir à la figure 36.

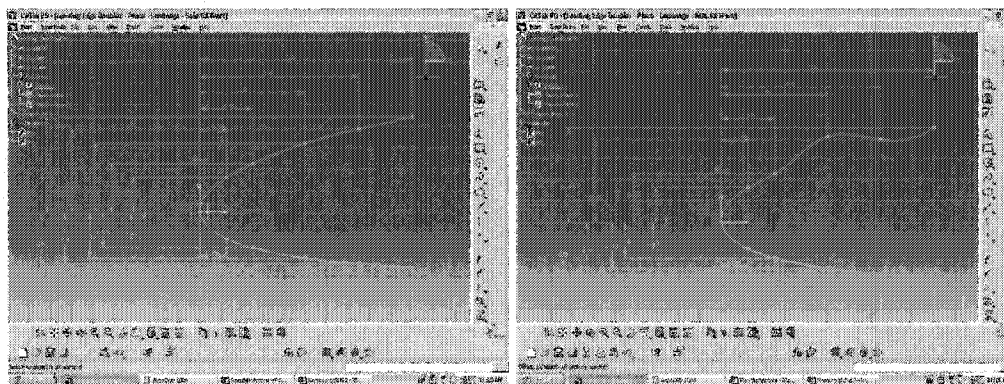


Figure 36 Esquisse – avant et après

À la figure 37, on peut voir, à gauche, la pièce avant mise à jour et à droite, la même pièce modifiée. On constate qu'une grande partie de la définition du contour de la poche sera modifiée.

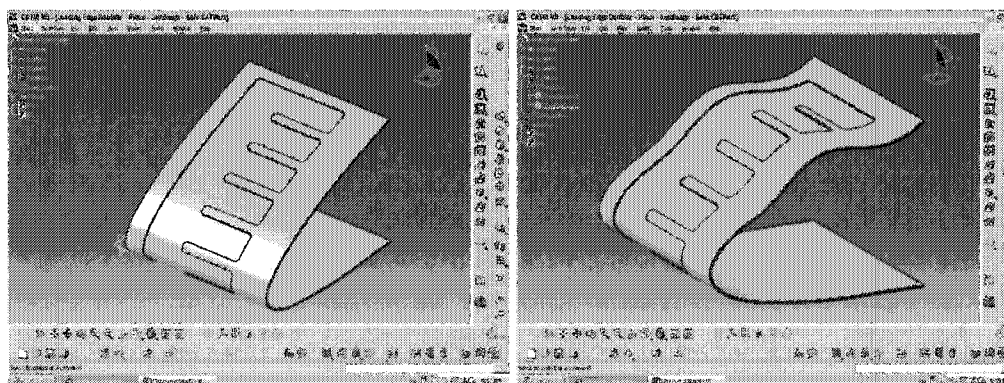


Figure 37 Tôle de revêtement – avant et après

La figure 38 montre très bien que la propagation de la modification est faite directement dans le modèle du gabarit de découpe. À gauche, on peut voir le modèle du gabarit avant mise à jour. À droite, le même modèle après mise à jour.

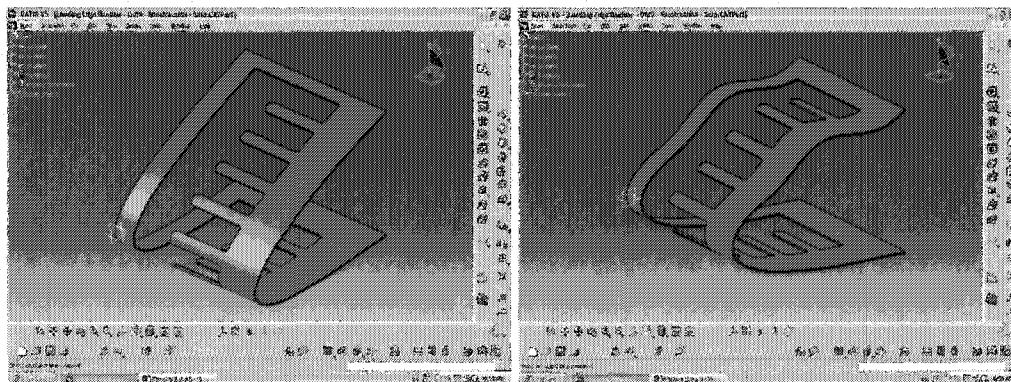


Figure 38 Gabarit de découpe – avant et après

4.6.2 Tôle de revêtement à simple courbure

L'assemblage qui a été produit pour permettre la définition des poches de cette pièce comportait 11 instances de cadres et 9 instances de lisses pour un total de 80 poches à produire. Les instances des différentes pièces ont été localisées dans l'assemblage à l'aide de contraintes d'assemblage.

La modification apportée à cet assemblage consistait à diminuer l'espacement existant entre les deux premiers cadres d'un côté de la tôle de revêtement. Cette modification entraînait le déplacement de tous les autres cadres, ce qui avait un impact sur les 80 poches.

La figure 39 présente les assemblages tôle de revêtement – structure et tôle de revêtement – gabarit de découpe avant la modification.

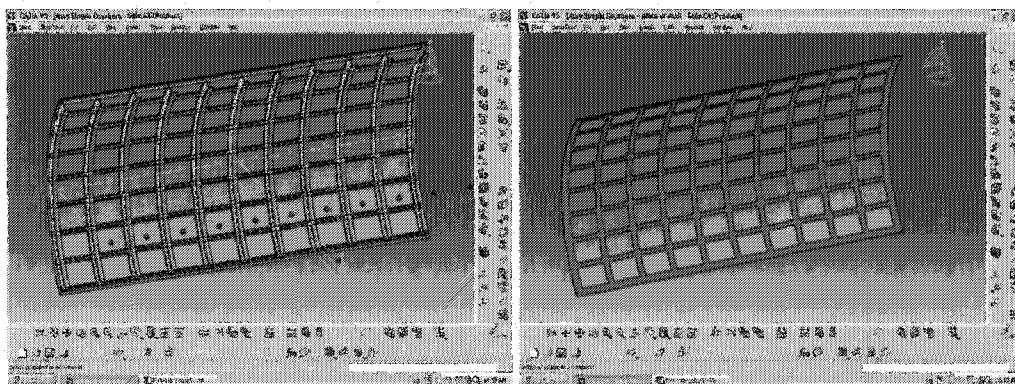


Figure 39 Assemblages tôle-structure et assemblage tôle-gabarit de découpe avant modification

À la figure 40, on veut illustrer la modification apportée à l'assemblage tôle de revêtement – structure : la distance entre les deux cadres est modifiée de 14 pouces à 7 pouces. Avant la mise à jour, la modification apparaît comme un changement de couleur⁷ et de valeur numérique de la contrainte d'assemblage.

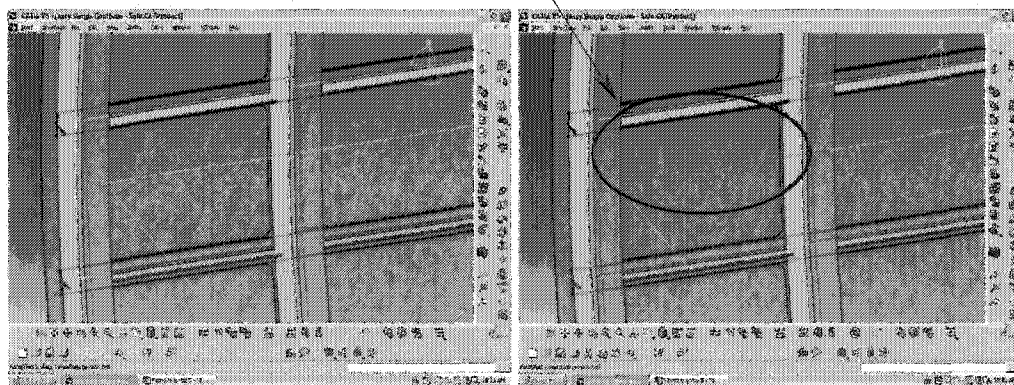


Figure 40 Modification apportée à l'assemblage tôle-structure

La mise à jour de l'assemblage demande le repositionnement de la grande majorité des cadres et par conséquent, la redéfinition des contours des 80 poches de la tôle de

⁷ La modification est difficile à voir avec un imprimé noir et blanc.

revêtement. La figure suivante montre l'assemblage tôle de revêtement-structure avant et après modification.

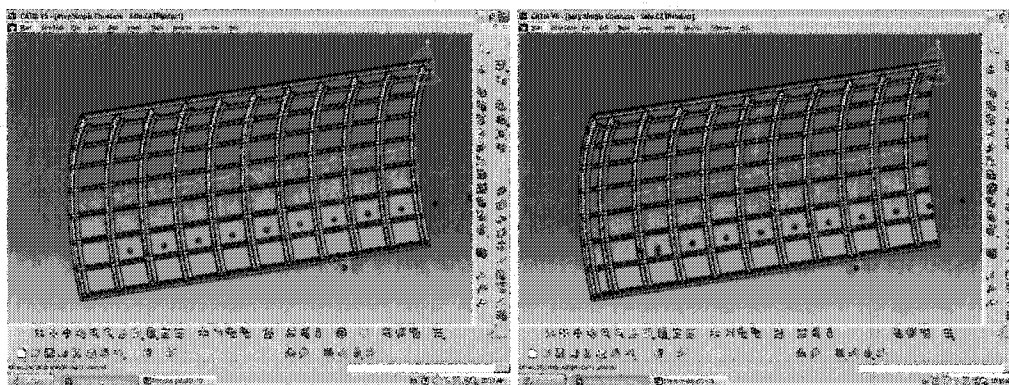


Figure 41 Assemblage tôle-structure – avant et après modification

La figure 42 illustre la propagation de modification à l'assemblage tôle de revêtement – gabarit de découpe.

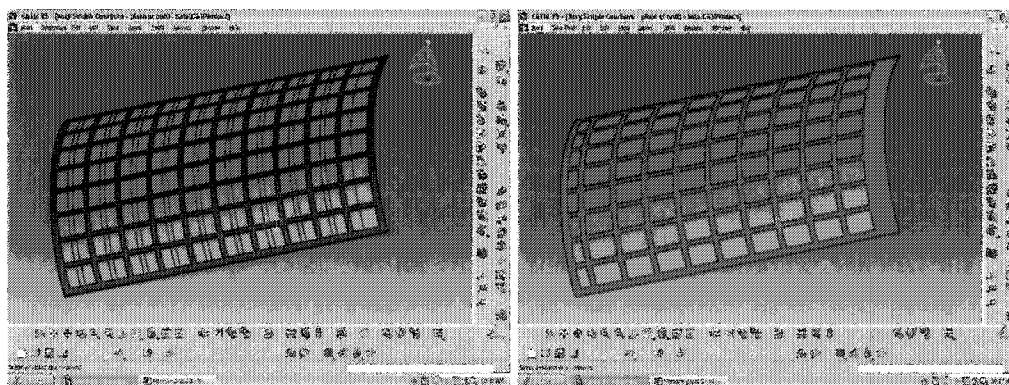


Figure 42 Assemblage tôle-gabarit de découpe – avant et après modification

On peut voir à la figure 43 les modèles de la tôle de revêtement et de son gabarit de découpe une fois mis à jour, après une modification importante apportée à la structure sur laquelle repose la tôle.

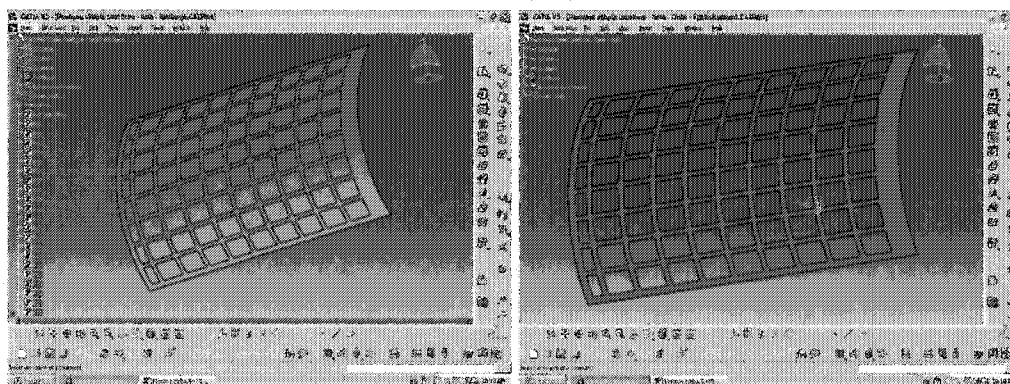


Figure 43 Tôle de revêtement et gabarit de découpe après mise à jour

On a comparé la modélisation des pièces et des outillages associés en employant d'une part des liens technologiques éphémères et, d'autre part, des liens technologiques persistants.

On a montré qu'il est possible de structurer des liens technologiques persistants au sein de la modélisation unifiée pièce-outillage en employant une méthodologie appropriée. On a aussi montré que la méthode de modélisation unifiée préconisée permet de propager les modifications du contexte de la pièce à la pièce et de la pièce à l'outillage. Reste à chiffrer les coûts et bénéfices de la mise en œuvre des liens technologiques persistants dans ce contexte de modélisation unifiée.

CHAPITRE 5

LES RÉSULTATS ET LEUR ANALYSE

5.1 Résultats de la modélisation

La méthodologie CATIA V4 actuelle s'appuie sur un outil informatique utilisant peu les liens technologiques persistants et qui conserve donc le résultat de la conception plutôt que la séquence de manipulations ayant mené à ce dernier. La géométrie intermédiaire menant à la création des contours de poches et des ouvertures de découpe du gabarit se présente sous la forme d'entités indépendantes non inter-reliées. Par exemple, lors de la création de congés sur une poche rectangulaire, le résultat final dans CATIA V4 comporte huit entités distinctes et indépendantes alors qu'avec CATIA V5, le résultat ne comporte qu'un seul élément appuyé par tout son historique de création.

Les tests effectués lors de la modélisation des pièces ont montré que cette particularité confère à CATIA V4 un avantage intéressant sur CATIA V5, lors de la création originale de la pièce et de l'outillage. La création de la pièce se fait rapidement de cette façon, le logiciel n'ayant pas à maintenir une multitude de liens technologiques. Cet avantage s'estompe rapidement lorsqu'une modification doit être apportée à une pièce. Le moindre changement amènera, de façon manuelle, la création de nouvelle géométrie, l'effacement de géométrie existante et la re-modélisation de la pièce. Dans un contexte évolutif, ce manque de possibilité de propagation des changements se traduit par des délais et des coûts supplémentaires non-négligeables.

Toute transition d'un outil de CAO à un autre amène une certaine baisse de productivité pour une période donnée. Cette baisse de productivité s'explique habituellement par le temps nécessaire aux usagers pour s'habituer aux fonctionnalités du nouvel outil CAO. Dans le cas présent, en plus de s'habituer à l'interface et aux fonctionnalités du logiciel, les usagers ont à maîtriser la philosophie reliée à l'emploi généralisé de liens technologiques persistants. Dans certains cas, cette philosophie augmente le temps

nécessaire à exécuter une tâche de façon considérable. La mesure du temps permettra donc d'évaluer la rentabilité d'un tel changement.

On rappellera que les tests de modélisation ont été faits sur des assemblages utilisant des tôles appartenant à la première famille de pièces présentée au chapitre 1 ainsi que sur une pièce à poche complexe appartenant à la deuxième famille. Ces familles comptent respectivement pour 45% et 30% du volume annuel de tôle de revêtement usinées chimiquement. On peut voir les pièces modélisées à la figure 44.

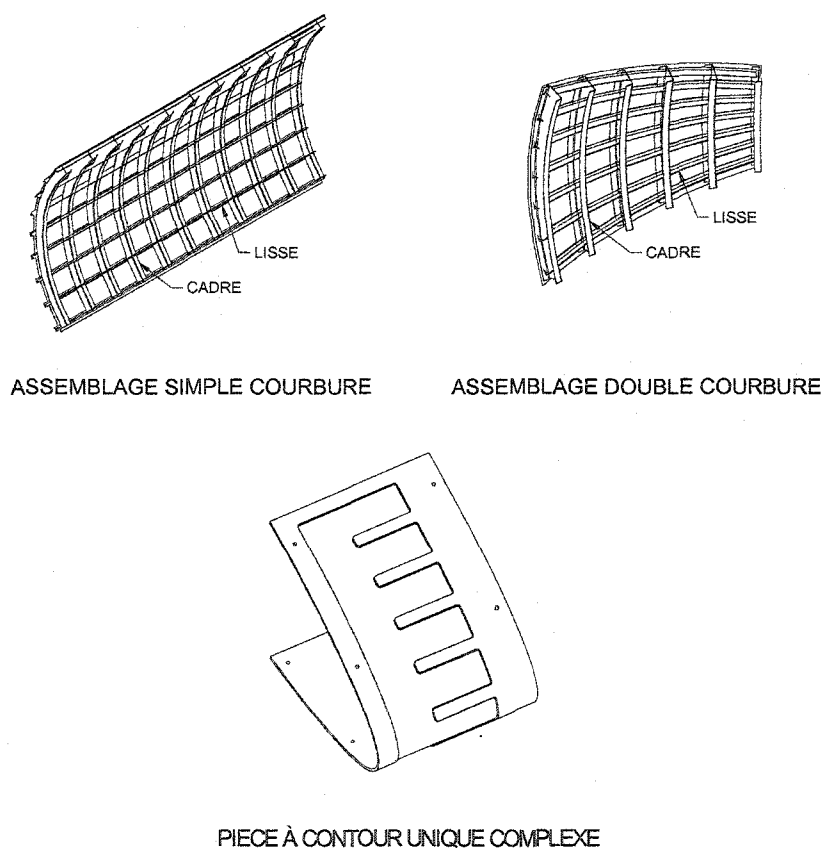


Figure 44 Pièces modélisées

Les caractéristiques des assemblages utilisés pour la définition des poches sur les tôles de revêtement définies en contexte sont présentées au tableau I.

TABLEAU I

Caractéristiques des assemblages

Éléments	Configuration simple courbure	Configuration double courbure
Tôle de revêtement	1	1
Lisses	9	7
Cadres	11	6
Poches	80	30

Dans le but de maîtriser la géométrie et les techniques de modélisation, chaque pièce a été modélisée à plusieurs reprises, avec CATIA V4 et CATIA V5, avant que ne soient prises les mesures de temps.

Pour effectuer les différentes manipulations requises pour les modélisations, deux systèmes informatiques distincts ont été utilisés, un sous CATIA V4, l'autre sous CATIA V5. Les spécifications de ces derniers sont présentées au tableau suivant.

TABLEAU II

Spécifications des systèmes informatiques employés

Caractéristiques	Logiciel de CAO	
	CATIA V4	CATIA V5
Marque	IBM	Toshiba
Modèle	7043-150	Satellite 2450-3DY
Horloge	375 MHz	2.6 GHz
Mémoire vive	512 Mb	1 Gb
Disque rigide	9.1 Gb	40 Gb
Carte graphique	GXT3000	NVIDIA GeForce 4
Moniteur	P260	TFT Active Matrix
Système d'exploitation	A.I.X. 4.3.3	MS Windows XP Home
Version CATIA	4.2.2	5.12 GA

De manière à simplifier le repérage des différentes mises en situation, la numérotation suivante a été utilisée :

- Cas 1 : Tôle de revêtement à simple courbure;
- Cas 2 : Tôle de revêtement à double courbure;
- Cas 3 : Pièce à poche unique complexe.

Finalement, dans la démarche visant à vérifier les temps de création de géométries semblables à l'aide des deux logiciels, les tests ont été effectués par un seul utilisateur possédant une bonne connaissance des deux outils. L'hypothèse a été posée que peu importe la rapidité de l'usager, les variations de temps en pourcentage (%) seraient sensiblement les mêmes pour différents individus.

Les résultats obtenus pour les différentes validations sont présentés dans les tableaux apparaissant aux pages suivantes.

Le tableau III présente les temps de modélisation et l'espace mémoire requis pour la modélisation des tôles de revêtement, sous CATIA V4 et CATIA V5, en utilisant les approches méthodologiques proposées.

Le tableau IV présente les temps de modélisation et l'espace mémoire requis pour la modélisation des gabarits de découpes associés, sous CATIA V4 et CATIA V5, en utilisant les approches méthodologiques proposées.

Le tableau V présente les temps de modélisation et l'espace mémoire requis pour la modélisation des tôles de revêtement et de leur outillage associé, sous CATIA V4 et CATIA V5, en utilisant les approches méthodologiques proposées. Ce tableau permet d'avoir une vue d'ensemble de la méthodologie de conception unifiée proposée.

TABLEAU III

Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5
Modèles des pièces à traiter par usinage chimique

Type Pièce	CATIA V4				CATIA V5			
	Laminage (A)		Soustraction (B)		Laminage (A)		Soustraction (B)	
	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire
	min	kb	min	kb	min	kb	min	kb
Cas 1 80 poches	40 (93%)	3710 (77%)	43 (100%)	4790 (100%)	111 (258%)	6181 (129%)	115 (267%)	5673 (118%)
Cas 2 30 poches	14 (78%)	1540 (90%)	18 (100%)	1710 (100%)	42 (233%)	2691 (157%)	46 (256%)	3510 (205%)
Cas 3 1 poche	8 (73%)	704 (111%)	11 (100%)	632 (100%)	11 (100%)	1176 (186%)	13 (118%)	1036 (164%)
Décompte Global	62 (86%)	5954 (83%)	72 (100%)	7132 (100%)	164 (228%)	10048 (141%)	174 (242%)	10219 (143%)

TABLEAU IV

Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5
Modèles des gabarits de découpe

Type Gabarit de découpe	CATIA V4				CATIA V5			
	Épaississement (A)		Soustraction (B)		Épaississement (A)		Soustraction (B)	
	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire
	min	kb	min	kb	min	kb	min	kb
Cas 1 80 poches	36 (82%)	3640 (76%)	44 (100%)	4810 (100%)	28 (64%)	4440 (92%)	36 (82%)	5390 (112%)
Cas 2 30 poches	11 (69%)	1040 (51%)	16 (100%)	2040 (100%)	15 (94%)	2710 (133%)	17 (106%)	3340 (164%)
Cas 3 1 poche	5 (83%)	628 (71%)	6 (100%)	884 (100%)	3 (50%)	556 (63%)	3 (50%)	736 (83%)
Décompte Global	52 (79%)	5308 (69%)	66 (100%)	7734 (100%)	46 (70%)	7706 (100%)	56 (85%)	9466 (122%)

TABLEAU V

Comparaison entre CATIA V4 et CATIA V5
Ensemble des pièces et des gabarits de découpe

Type Cas	CATIA V4				CATIA V5			
	Laminage ou Épaississement (A)		Soustraction (B)		Laminage ou Épaississement (A)		Soustraction (B)	
	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire	Temps	Mémoire
	min	kb	min	kb	min	kb	min	kb
Cas 1 80 poches	76 (87%)	7350 (77%)	87 (100%)	9600 (100%)	139 (160%)	10621 (111%)	151 (174%)	11 063 (115%)
Cas 2 30 poches	25 (74%)	2580 (69%)	34 (100%)	3750 (100%)	57 (168%)	5401 (144%)	63 (185%)	6850 (183%)
Cas 3 1 poche	13 (76%)	1332 (88%)	17 (100%)	1516 (100%)	14 (82%)	1732 (114%)	16 (94%)	1772 (117%)
Décompte Global	114 (83%)	11262 (76%)	138 (100%)	14866 (100%)	210 (152%)	17754 (119%)	230 (167%)	19685 (132%)

5.2 Analyse des résultats de la modélisation

Les tableaux des pages précédentes ont présenté les résultats obtenus pour les tests de modélisation des différentes pièces. Dans tous les cas, une référence de 100% a été placée à la modélisation des pièces utilisant la méthodologie de soustraction sous CATIA V4, méthodologie étant employée en entreprise actuellement.

En comparant les résultats, on peut faire les remarques suivantes :

- Il existe une énorme différence de temps requis pour faire la modélisation des tôles à simple et double courbure (Cas 1 ou Cas 2) à l'aide de CATIA V5, au lieu de CATIA V4. Cette différence excède 200% pour les quatre méthodologies comparées. À première vue, l'introduction de V5 semble coûteuse en productivité.
- Le temps requis lors de la modélisation de la tôle à poche unique est sensiblement le même que pour faire le même travail avec la méthodologie actuelle V4, peu importe l'approche employée en V5.
- Une constatation intéressante à relever est celle qui compare les approches de modélisation par laminage et par épaissement à celle de la méthodologie employée en industrie (soustraction). Ces deux approches, sensiblement pareilles, ont permis de réaliser des gains de temps dans tous les tests effectués, avec CATIA V4 et CATIA V5. Pour le laminage, les économies de temps varient entre 4% et 27%, avec une économie moyenne de près de 15% alors que pour l'épaissement, les économies varient de nulle à 31%, avec une moyenne de près de 20%. Il est d'ailleurs à noter que même en demeurant sous CATIA V4, l'utilisation des approches de laminage et d'épaissement au lieu de celle employée actuellement permettrait de réaliser des économies de temps appréciables. On peut même penser à proposer un changement méthodologique visant à optimiser le temps de modélisation : le passage de l'approche par

soustraction, tel qu'employée actuellement par l'entreprise, aux approches de laminage et de soustraction. Ce simple changement peut à lui seul amener des économies de temps allant jusqu'à 25% pour la création des tôles et jusqu'à 30% pour le gabarit de découpe.

- À cause de la grande différence de temps requis pour la préparation des modèles de tôles, le temps total mesuré pour la création du modèle de la tôle et de son outillage est toujours plus élevé d'au moins 150% dans le cas des pièces comportant beaucoup de poches.
- En termes de mémoire requise pour les fichiers, on peut constater que dans la plupart des cas, des économies sont faites en employant une méthode de laminage ou d'épaississement par rapport à la méthode de soustraction. On note aussi que de façon globale, pour la tôle de revêtement et son outillage, CATIA V5 requiert plus de mémoire pour le stockage des fichiers que CATIA V4.

5.2.1 Remarques relatives à CATIA V4

Il est intéressant de noter que certaines opérations dans CATIA V4 peuvent être effectuées plus rapidement qu'avec CATIA V5, simplement à cause de la façon dont fonctionne le logiciel. Par exemple, avec une préparation préalable des éléments, il est possible de faire des sélections d'objets par mots-clé entrés au clavier (*col – pour une sélection par couleur, *crv – pour sélection de toutes les entités de type *curve*), ce qui est plus simple que de définir un filtre d'objets dans CATIA V5.

Aussi, on peut mentionner qu'une tentative a été faite dans le but d'épargner du temps lors de la sélection des contours et éventuellement, lors de la définition des contours des ouvertures dans un gabarit. Il s'agit de produire une entité unique pour le contour de chacune des poches en utilisant la commande *Concatenate*. Si le résultat premier s'est avéré correct lors de la création de la pièce, les résultats obtenus lors de la création de l'outillage avec ces entités ont montré de nombreuses anomalies. La copie

parallèle géodésique de cette nouvelle entité, lors de la création de l'outillage, a souvent donné une distorsion non-négligeable du résultat obtenu, tel qu'illustré à la figure 45.

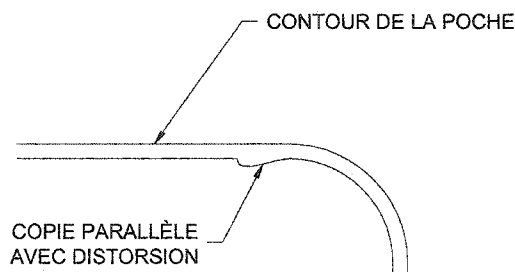


Figure 45 Distorsion de décalage

La concaténation des éléments à copier parallèlement a donc été supprimée de la méthodologie de modélisation.

Finalement, un dernier aspect intéressant à noter, puisqu'il peut entraîner des pannes de système lorsque non-respecté, est le fait que lors de la création d'une face unique pour une tôle comportant un grand nombre de poches, la démarche de sélection et d'acceptation des contours délimitant les différents domaines devient très répétitive. Si l'opération est faite avec trop d'empressement, ne donnant pas le temps au logiciel d'accepter la géométrie, il s'ensuit une panne du logiciel (ABEND). Cette particularité a malheureusement été vérifiée à de très nombreuses reprises.

5.2.2 Remarques relatives à CATIA V5

Dans un premier temps, la boîte de dialogue de la commande permettant de produire des copies de courbes parallèles – *Parallel Curve* – offre l'option d'effectuer cette copie de façon euclidienne ou géodésique, comme on le voit à la figure 46. L'option euclidienne apparaît par défaut, alors que l'option géodésique doit être utilisée en tout temps. Le réglage de cette option par défaut éliminerait bon nombre d'erreurs dues à la distraction et sauverait du temps à l'utilisateur.

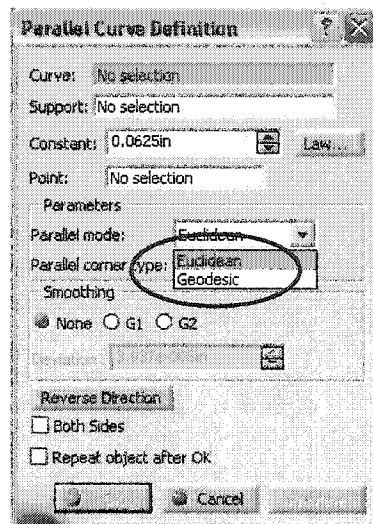


Figure 46 Boîte de dialogue pour courbes parallèles

Autre aspect à noter avec l'emploi de CATIA V5 : en raison de l'absence de la possibilité d'indiquer (*Indicate* - sélection non précise, comme dans CATIA V4), certaines commandes demandent à l'opérateur des interactions qui augmentent le temps de modélisation.

Un exemple de ceci se trouve dans la création de congés de raccordement géodésiques. Lorsque deux entités s'entrecroisent et que la valeur du rayon du congé le permet, quatre possibilités se présentent, comme on peut le constater à la figure 47. L'utilisateur doit alors faire le choix du congé désiré lorsque ce dernier n'est pas offert par défaut et il doit finalement confirmer son choix dans la boîte de dialogue.

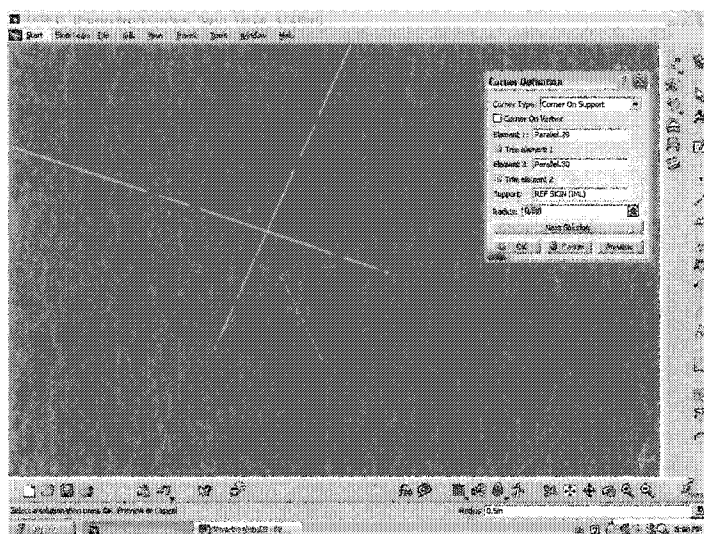


Figure 47 Options multiples lors de la création de congés

Un autre exemple de cette particularité se rencontre lorsqu'un élément est coupé à l'aide de la commande *Split*. Que ce soit pour un élément filaire ou surfacique, le logiciel présentera toujours un certain choix à l'utilisateur afin de lui permettre de conserver un côté ou l'autre de l'élément coupé, mais ce choix n'est malheureusement pas lié à l'emplacement du point de sélection sur l'entité. Il est toujours possible d'obtenir l'autre alternative, comme on peut le voir à la figure 47, représentant l'opération de découpe d'une surface.

Cependant, ces manipulations faites par l'utilisateur amènent une augmentation du temps nécessaire à exécuter la tâche, en comparaison du temps nécessaire dans CATIA V4 où la fonction *Limit1 – Break* donne par défaut les deux portions de l'élément coupé par simple sélection de l'élément servant de référence à la découpe.

On peut noter, dans la boîte de dialogue montrée à la figure suivante, le bouton *Other side* qui permet la sélection alternative.

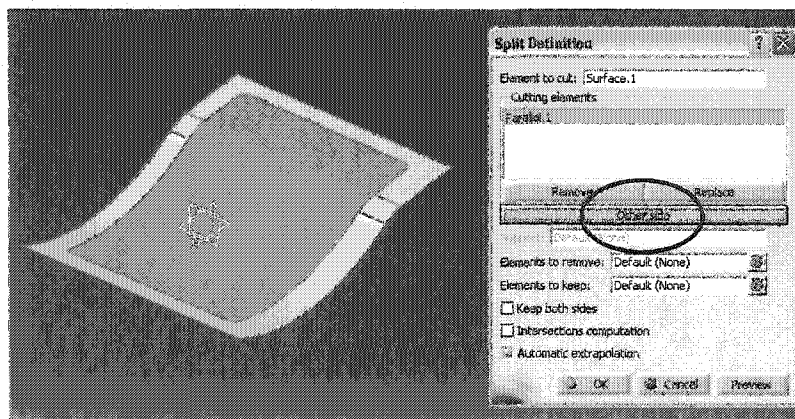
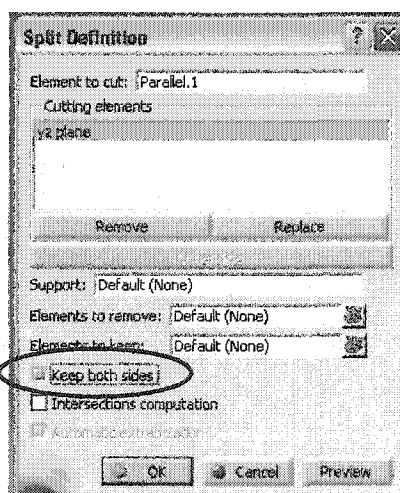


Figure 48 Alternatives de découpe

Dans un autre cas, une gestion différente des options de la même commande *Split*, permettrait une certaine économie de temps. En effet, cette commande élimine par défaut une partie de l'élément choisi. Dans ce cas particulier de modélisation, il serait intéressant que l'option consistant à conserver les deux parties de l'élément découpé soit activée, comme c'est le cas à la figure 49. Sans la rendre active par défaut, il serait profitable qu'elle conserve les derniers paramètres entrés. Ainsi, une fois la première découpe d'éléments filaires effectuée, la commande garderait automatiquement les deux entités.

Figure 49 Boîte de dialogue pour découpe – *Split*

La création de congés sur les éléments en appui sur des surfaces a pour effet de créer un nouvel élément de type Corner et d'envoyer les deux éléments parents dans l'espace *No-Show*. Ce comportement amène un problème quand vient le temps de produire un contour fermé. Si les trois premiers congés se réalisent facilement, le dernier est impossible à produire, l'élément se croisant lui-même.

Pour contourner ce problème, la solution suivante a été employée : un point est produit au milieu de l'un des éléments filaires formant le contour. L'élément filaire en question est ensuite découpé de manière à conserver ses deux segments maintenant bout à bout. Une fois le contour défini par cinq segments, il est possible de produire les quatre congés. La figure 50 illustre le problème et sa solution.

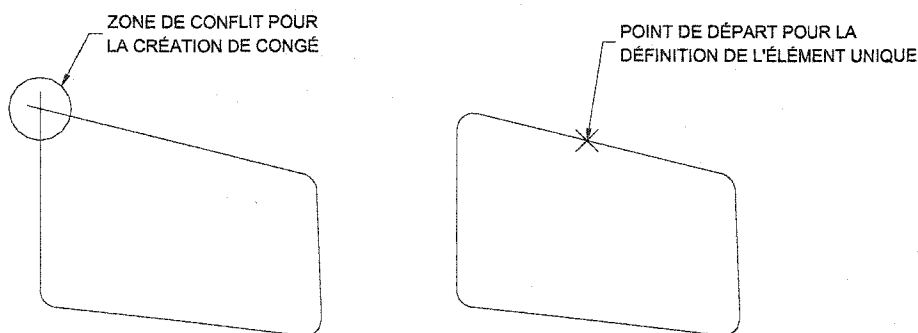


Figure 50 Problématique de production de congés

Quoique l'emplacement de la découpe faite par le point soit arbitraire, le choix du point milieu d'un segment donné s'avère pratique et logique, évitant ainsi des conflits de frontières lorsqu'un point se trouve placé trop près de l'extrémité. Lors de la création des points, il serait efficace que l'option permettant la création du point milieu soit offerte par défaut, comme on le voit à la figure 51.

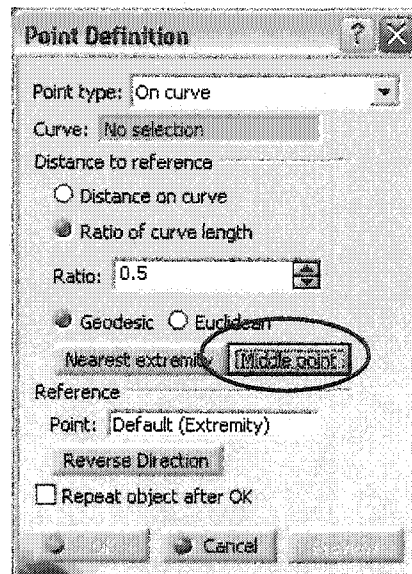


Figure 51 Boîte de dialogue pour les points faits sur courbe

Finalement, un dernier aspect à mentionner concernant la modélisation à l'aide du logiciel CATIA V5 est le fait que V5 conserve les liens entre les éléments géométriques, contrairement à ce que fait CATIA V4. Ce comportement se traduit par la gestion et le stockage de centaines, voire de milliers d'éléments géométriques lors de la modélisation d'un simple panneau de revêtement comportant moins d'une centaine de poches. Comme on peut le constater au tableau VI, les éléments géométriques gérés et stockés dans le modèle solide avec CATIA V5 sont beaucoup plus nombreux qu'avec CATIA V4.

On peut constater que dans tous les cas CATIA V5 doit gérer plus de liens persistants que CATIA V4 pour un modèle solide semblable. Pour les cas dont la méthodologie fait référence à la soustraction, méthodologie employée actuellement avec CATIA V4, le nombre d'entités est près de dix fois plus élevé avec CATIA V5 qu'avec CATIA V4.

TABLEAU VI

Entités géométriques gérées et stockées dans les modèles de pièces

CATIA V5						
Type d'élément	Cas 1 (80 poches)		Cas 2 (30 poches)		Cas 3 (1 poche)	
	Lamin.	Soust.	Lamin.	Soust.	Lamin.	Soust.
Surfaces	1	1	1	1	1	1
Planes	0	0	8	8	3	3
Intersect.	0	0	12	12	4	4
Parallèles	52	52	28	28	29	29
Ext. Ref	36	36	22	22	0	0
Splits	729	808	267	267	37	37
Points	80	80	39	39	1	1
Corners	320	320	120	120	40	40
Publicat	81	81	49	49	2	2
Solids	2	81	2	32	2	2
Total	1300	1458	548	578	118	118
CATIA V4						
Type d'élément	Cas 1 (80 poches)		Cas 2 (30 poches)		Cas 3 (1 poche)	
	Lamin.	Soust.	Lamin.	Soust.	Lamin.	Soust.
Surfaces	1	1	1	1	1	1
Faces	1	80	1	30	1	1
Solids	2	81	2	31	2	2
TOTAL	4	162	4	62	4	4

Puisqu'il est important de pouvoir revenir régulièrement à la structure de modélisation de la pièce pour y référer, il est recommandé de veiller à bien identifier les éléments dans l'arbre de construction du modèle.

Dans les pièces qui ont été modélisés pour fins de tests, la convention suivante a été suivie :

- La surface de référence – IML de la pièce usinée chimiquement comportant les poches a été identifiée *REF SKIN*;
- Les contours des poches sur la tôle de revêtement ont été identifiés P01 à PXX;
- Les contours des ouvertures sur le gabarit de découpe ont été identifiés T01 à TXX.

De plus il est important de mettre en évidence le fait que l'usage des outils de CAO utilisant des liens technologiques persistants amène l'obligation de développer des méthodologies de travail strictes et rigoureuses si on veut exploiter de façon optimale l'emploi de ces liens et les possibilités de modification. Par, exemple, avec le nombre d'entités stockées dans le modèle, l'identification rigoureuse des éléments de référence n'est qu'un premier pas en direction de ce qui devra être considéré dans toute méthodologie. Sans cette identification, un usager éprouvera de la difficulté à retrouver ses marques dans son propre modèle et en éprouvera encore plus en tentant de modifier le modèle d'un autre concepteur. Encore, une identification déficiente bloquera toute possibilité d'exploitation des avantages de la publication, avantages directement liés au remplacement de pièces par d'autres dans une maquette numérique.

En guise de conclusion, on peut constater qu'étant donné la démarche très répétitive impliquée par la création de la géométrie des contours, il pourrait être intéressant, pour économiser du temps et rendre certaines démarches plus optimales, de procéder à certaines personnalisations du logiciel.

Dans tous ces cas, le réglage par défaut des options aurait épargné du temps de modélisation et éliminé des sources d'erreurs lors de la création des courbes parallèles. Il est cependant évident que les réglages effectués pour ce type de modélisation peuvent s'avérer contradictoires avec la modélisation d'autres types de pièces. Au lieu de penser à une personnalisation permettant de régler ces options par défaut, il est suggéré de travailler à régler le logiciel pour qu'il conserve les derniers paramètres

entrés pour ces commandes. Ainsi, les réglages seraient à faire la première fois mais ne seraient pas constamment à reprendre.

Une grande partie du temps de modélisation sous CATIA V5 dépend directement des réglages à faire pour l'exécution des différentes commandes, réglages qui consistent en des opérations manuelles faites par le concepteur : changements de points de vue, agrandissement de scènes, sélection d'entités, sélection à l'intérieur de boîtes de dialogue, changement d'options par défaut, etc. Ce temps est nécessaire à un usager en temps interactif, mais pourrait être évité par l'usage d'une application automatisant la production des tôles et de leur outillage en utilisant les énormes possibilités des liens technologiques.

5.3 Résultats de modifications avec CATIA V5

Dans un environnement industriel où CATIA V5 sera employé, une bonne partie du travail de modification se trouvera simplifié grâce aux liens technologiques. L'avantage obtenu lors des modifications sera cependant tributaire d'une complexité accrue lors de la création de la géométrie et de la structuration des liens dans le modèle, ce qui mène à un temps de conception initiale plus élevé que si la modélisation de la pièce était faite avec CATIA V4.

Cependant, ce coût à payer s'avère très rentable dans le cas des modifications dont la propagation est automatique. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les changements présentés au chapitre précédent. Les résultats sous V5 incluent le temps nécessaire à apporter les modifications aux différents modèles : la modification de la courbe génératrice de la pièce du cas 3 et le déplacement du second cadre dans l'assemblage du cas 1. Les résultats sous V4 reprennent les temps de modélisation des pièces complètes suivant les approches de laminage et d'épaississement, pour fin de comparaison.

TABLEAU VII

Temps de modification des fichiers

	CATIA V4		CATIA V5		
Cas	Pièce	Gabarit de Découpe	Pièce	Gabarit de découpe	Gain
No 3 (1 poche)	8 minutes	5 minutes	30 secondes	7 secondes	12.4 min (95 %)
	13 minutes (100 %)		37 secondes (5 %)		
No 1 (80 poches)	40 minutes	36 minutes	55 secondes	33 secondes	74.5 min (98 %)
	76 minutes (100%)		1 min 28 secondes (1.5 %)		

Comme il a été mentionné précédemment, il n'y a pas eu de tests de modification sous V4 étant donné le fait que les liens éphémères n'assurent pas la propagation automatique des changements. Si on réfère aux tableaux III et IV, qui présentent les temps de modélisation des pièces et de leur outillage associé, on peut rappeler que pour le cas 3, les meilleurs temps obtenus pour la modélisation de la pièce et de l'outillage ont été de 8 et de 5 minutes alors que pour le cas 1, les meilleurs temps obtenus ont été de 40 et 36 minutes. On peut donc constater que la différence entre CATIA V4 et CATIA V5 en situation de modification est considérable.

5.4 Analyse des résultats des modifications

Les résultats obtenus sont très révélateurs de l'efficacité accrue permise par l'emploi d'un logiciel exploitant des liens technologiques persistants de façon généralisée, tels CATIA V5. L'investissement de temps requis pour la préparation des modèles en vue d'une conception unifiée pièce – outillage s'est avéré très rentable au niveau de la modification. Les temps obtenus pour faire les mises à jour dans les deux cas de

modification des modèles CATIA V5 sont pratiquement moins longs que le temps d'ouverture des assemblages équivalents avec CATIA V4.

L'avantage d'utiliser une méthodologie spécifique pour favoriser la conception unifiée d'une pièce et de son outillage est indiscutable. Puisqu'une pièce évolue à plusieurs reprises durant sa vie utile, le fait de devoir passer plus de temps à sa conception sera vite amorti par les économies faites aux différentes modifications qu'elle aura à subir.

La CAO aéronautique a tout à gagner à utiliser une méthodologie unifiant les différents aspects de l'ingénierie de production, lorsqu'elle s'appuie sur un logiciel de nouvelle génération favorisant cette unification.

L'utilisation des méthodologies présentées démontre l'efficacité d'un outil de nouvelle génération dans un environnement de conception unifiée pièce-outillage. Les temps enregistrés pour les modifications des modèles V5 laissent présager des économies de temps appréciables.

5.5 Généralisation à partir des résultats

En ce qui a trait au concept de modélisation unifiée pièce-outillage, les points suivants peuvent être relevés :

- Dans un contexte de méthodologie de modélisation unifiée, un bénéfice important peut être obtenu en structurant adéquatement le modèle situé en amont ;
- Il est primordial d'assurer une identification et une classification claire et rigoureuse des éléments utilisés en référence. Cela aura pour effet de faciliter la compréhension de la méthode suivie par le concepteur lors de la modélisation et de mettre en évidence les entités géométriques importantes du modèle ;
- Il est important d'assurer une communication claire entre le bureau des études et celui des méthodes pour déterminer les besoins liés à la gestion

optimale des liens persistants et ainsi définir adéquatement la géométrie devant être publiée. Dans un contexte trans-domaines, le travail fait par le fournisseur en amont dépend des besoins exprimés par le client en aval. Cette situation amène cependant une réflexion organisationnelle dans l'entreprise puisque les coûts et les bénéfices de la démarche ne sont pas nécessairement attribués au même département. Dans le cas qui nous intéresse, les coûts s'annoncent portés par l'ingénierie alors que les bénéfices seront retrouvés au bureau des méthodes ;

- La publication des éléments de référence est obligatoire pour la simplification du remplacement d'une pièce par une autre en contexte, mais offre aussi l'avantage, pour le concepteur, de faciliter la recherche des éléments de référence d'une pièce dans l'arbre de spécifications. Nous préconisons donc l'emploi du mécanisme de publication à cette fin.
- Les concepts de structuration du modèle en amont, de publication des éléments pertinents et d'emploi de liens persistants, appliqués ici dans le contexte méthodologique trans-domaine pièce-outillage, peut offrir des bénéfices aussi importants au sein d'un seul domaine, comme celui du bureau des études, lorsque des informations doivent être partagées entre différents modèles du produit ;
- Une méthodologie servant à accomplir une tâche n'est pas toujours optimale. Un examen de la tâche à effectuer avec un regard différent peut amener des gains de productivité intéressants. Dans l'approche présentée ici, des gains moyens de 20% ont été enregistrés ;
- Dans un contexte de mise en œuvre de CATIA V5, une gestion efficace des valeurs employées par défaut dans les panneaux de commandes peut occasionner des économies de temps appréciables aux concepteurs.

CHAPITRE 6

PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

6.1 Perspectives d'automatisation de la méthode de modélisation des outillages

Puisqu'une grande partie du temps nécessaire à la modélisation des pièces est directement liée aux opérations manuelles faites par l'utilisateur, des efforts devraient être investis dans la mise en place d'outils informatiques assistant le concepteur et facilitant la conception unifiée des pièces et de leur outillage. D'ailleurs, la méthodologie proposée dans ce mémoire, en plus de servir de base de travail pour la création manuelle des pièces dans un environnement CATIA V5, peut aussi servir de point de départ pour la création de conception automatique des tôles et des outillages associés. Cet outil pourra alors exploiter davantage les notions de conception orientée-métier, de typage fort des entités, d'empreinte et de pseudo-empreinte et, finalement, de liens technologiques persistants.

Pour mettre en place une stratégie efficace de création d'outillage, deux approches de modélisation tendant vers l'unification pièce-outillage peuvent être envisagées. Les résultats d'efforts déployés présentement au LIPPS dans le but d'automatiser la création des poches amènent une idée intéressante pour la création de la pièce qui simplifierait énormément la création de l'outillage associé. Ces deux approches sont présentées ci-dessous :

6.1.1 Exploitation des caractéristiques de la pièce

Des travaux présentement menés au LIPPS par Bruno Lamarche visent à utiliser un procédé de typage des éléments de structure d'un aéronef, pour définir un objet caractéristique visant à produire une poche directement dans le panneau de revêtement. Dans CATIA V5, cette notion se matérialise sous la forme de *User Defined Feature – UDF*.

Cette méthode vise la création d'une caractéristique utilisant un certain savoir-faire spécialisé pour générer le volume de matière à enlever, afin de créer la poche.

Cette approche pourrait facilement être extrapolée de manière à ce que la caractéristique utilisée pour la pièce soit publiée et utilisée comme base dans le modèle de l'outillage de découpe. Elle pourrait être modifiée de façon à ce que le contour utilisé pour produire le contour de la poche soit recopié vers l'intérieur de celle-ci; dans le but de répondre aux exigences de la modélisation de l'outillage de découpe.

L'approche basée sur l'utilisation d'une caractéristique ayant servi à la création d'une poche dans le modèle de la pièce pour la modifier et l'utiliser dans le modèle de l'outillage pour créer l'ouverture nécessaire s'avère intéressante. Elle permettrait d'utiliser la même méthodologie de programmation pour arriver à la génération d'un deuxième modèle et assurerait la continuité et la propagation des modifications.

La figure 52 illustre l'idée de la modélisation par caractéristique.

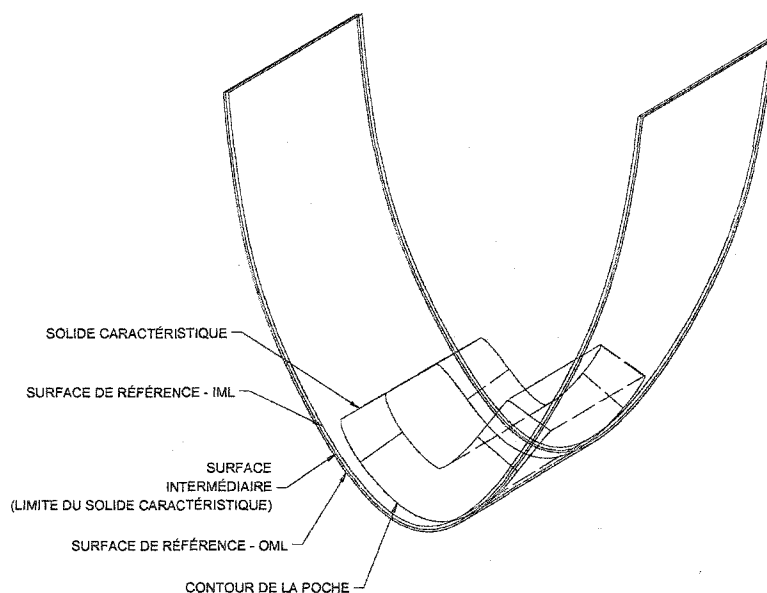


Figure 52 Modélisation du gabarit par caractéristique

6.1.2 Exploitation de la définition de l'un des solides utilisé dans l'approche par laminage

Cette approche peut s'avérer intéressante, mais demande une modification majeure à la façon dont la pièce solide (la tôle de revêtement elle-même) est modélisée.

La nouvelle approche demande de produire le solide de la tôle de revêtement par laminage, comme ce fut effectué lors des manipulations. Le solide est modélisé en deux parties : le premier solide, monolithique, représentant la partie de la feuille de métal non attaquée par l'usinage chimique, et le deuxième solide, ajouré, représentant le matériel masqué avant l'attaque. En fait, cette approche exploite l'idée de la modélisation employée dans les cas de collages structuraux.

L'idée ici est de produire un solide à partir de la surface de référence - IML de la tôle et de tous les contours de poches PXX simultanément. L'intérêt de la méthode est d'obtenir un seul élément surfacique représentant la surface interne du panneau de revêtement qui a été protégée à l'aide de l'agent masquant. La figure 53 montre une telle surface, identifiée Split.889, découpée à l'aide des contours P01 à P80.

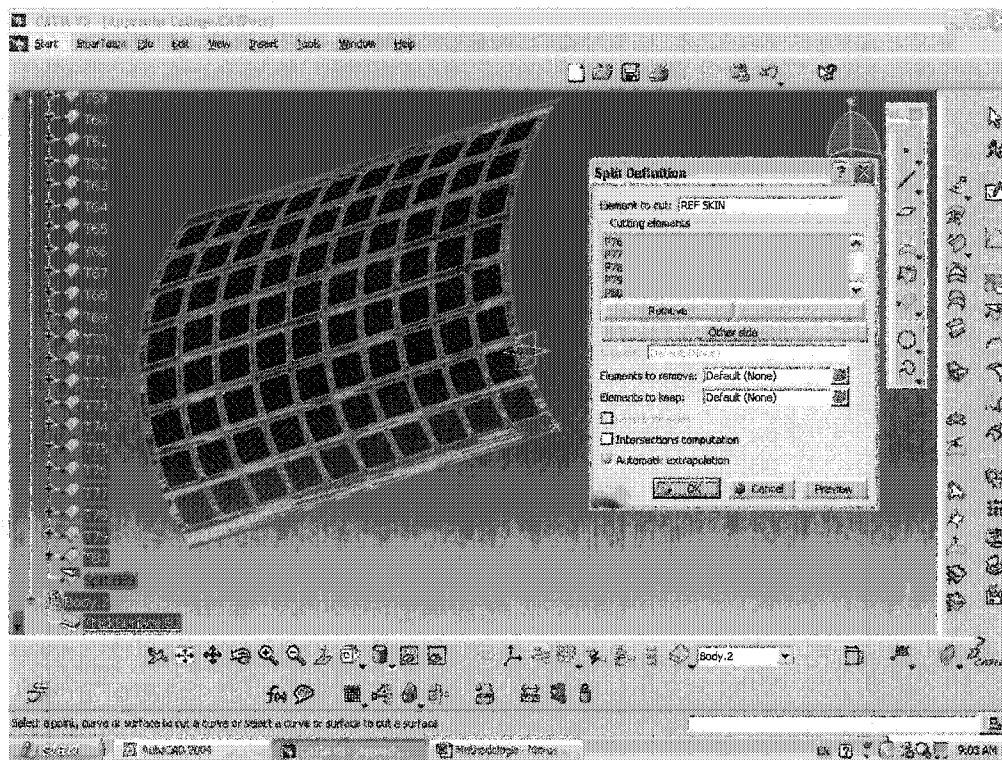


Figure 53 Surface de départ pour outillage

Une fois la pièce ainsi produite, les éléments surfaciques et filaires Surface de référence - IML, Surface trouée - Split.889 et PXX peuvent être publiés dans le modèle de la tôle de revêtement et utilisés dans le modèle du gabarit de découpe.

De nouveaux contours, TXX, peuvent ensuite être produits par copie parallèle géodésique, et il ne reste qu'à reproduire un élément du même type que l'élément Split.889, en remplaçant la définition des contours PXX par la définition de ceux nécessaires pour le gabarit de découpe, TXX, sans oublier d'inverser le sens de décalage du solide. L'approche est illustrée à la figure 54.

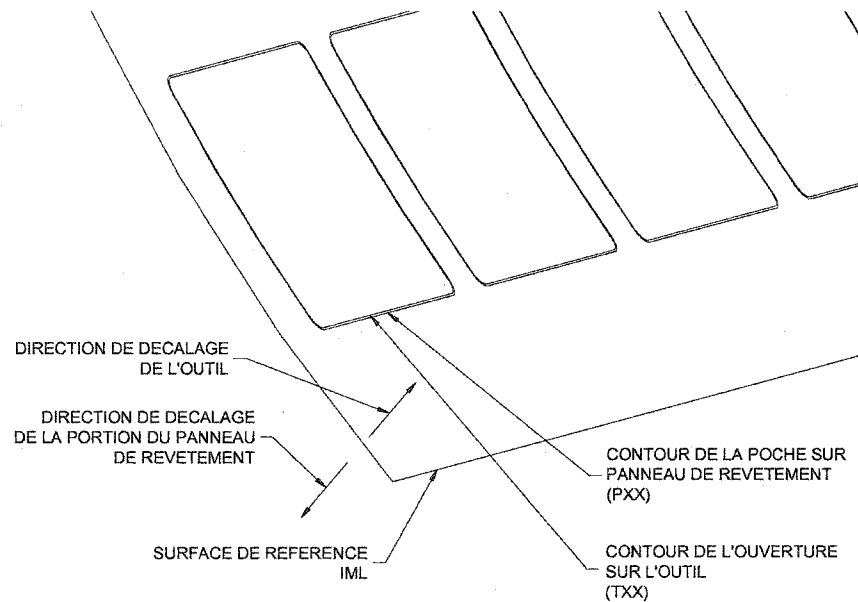


Figure 54 Approche par modification

Cette approche demande un changement méthodologique par rapport à la méthode actuelle employée pour modéliser les panneaux, mais peut simplifier de beaucoup la façon dont les outillages de découpe seront produits, puisque qu'il ne s'agit en fait que de remplacer des éléments dans la définition d'un nouvel élément surfacique servant à créer le modèle qui définit l'outillage.

6.2 Extension des résultats à d'autres domaines d'application

Le problème traité ici a été limité à l'étude des gabarits de découpe pour les pièces à usiner chimiquement, mais il comporte une problématique similaire à celle de tous les autres gabarits de découpe, qu'ils soient pour le découpage de pièces métalliques ou composites. Dans le cas étudié, il était nécessaire de déporter les courbes de définition du contour vers l'intérieur de la poche pour compenser l'effet de l'érosion latérale, lors de l'attaque de l'acide. Dans le cas de la modélisation d'un gabarit de découpe par toupillage ou autre outillage demandant un guide, il est nécessaire de déporter le contour de l'ouverture vers l'extérieur de celle-ci pour compenser le décalage occasionné par les différents éléments mécaniques permettant le suivi du patron défini par l'outillage, tel qu'illustré à la figure 55.

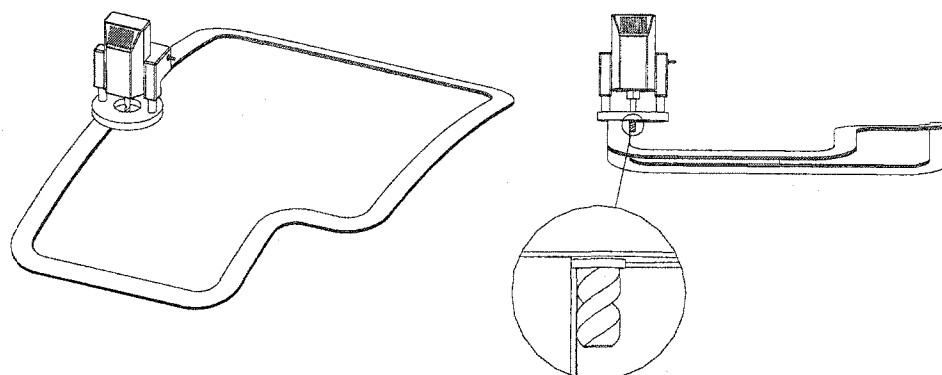


Figure 55 Gabarit de découpe pour toupillage

La méthode de travail employée pour la définition des contours des poches pour une pièce usinée chimiquement devient donc intéressante à utiliser comme base pour le développement de ces autres méthodologies.

Le fait de pouvoir utiliser un tissu de liens technologiques persistants à travers les différents modèles CAO attachés au modèle d'une pièce permet de faciliter la propagation des changements aux différentes étapes ultérieures à la pièce. Les contours des poches utilisés présentement pour servir de base à la définition des ouvertures, pour la modélisation de l'outillage, peuvent éventuellement servir à la définition des parcours d'outils de coupe dans les cas d'utilisation de robots de découpe par usinage à jet d'eau ou de laser. Cette dernière approche, quoique dispendieuse à l'acquisition, peut possiblement s'avérer économique à long terme, permettant d'économiser du temps de conception et de fabrication d'outillage, de même que du temps de découpe.

6.3 Autre cas d'application

Il est intéressant de mentionner qu'un nouveau stage en conception d'outillage a été effectué chez Pratt & Whitney Canada. Ce stage, orienté vers la création d'un modèle de départ (*Master Model*) pour un moule – *Encapsulation Die* fut une opportunité

d'intégrer et de mettre en application les concepts mis de l'avant dans le projet. La préparation adéquate de modèles et la publication d'éléments pour fins d'utilisation des liens technologiques persistants ont alors permis d'obtenir des gains immédiats en réalisant une tâche de positionnement en quelques minutes alors que cette même tâche prenait habituellement plusieurs heures avec CATIA V4. Encore une fois, l'usage d'une méthodologie appropriée montre des gains de plus de 90% dans le temps requis pour le positionnement et la modélisation. Le document qui a été distribué à la présentation de fin de stage a été placé en annexe.

Les outils CAO utilisant les liens persistants offrent de nouvelles possibilités d'optimisation aux entreprises et peuvent s'avérer rapidement profitables par l'emploi de méthodologies spécialisées et adéquates. Ce travail montre clairement que l'usage de nouveaux outils performants procure des gains remarquables dans le domaine industriel qu'est la conception d'outillage aéronautique.

CONCLUSION

La problématique considérée amenait un questionnement face à quatre aspects :

- Est-il faisable d'employer efficacement des liens technologiques persistants dans le cas de la modélisation unifiée pièce-outillage?
- Est-il possible de faciliter la propagation de changements en utilisant ces liens persistants?
- Est-il nécessaire de développer de nouvelles approches méthodologiques pour exploiter les avantages de la nouvelle génération d'outils de CAO?
- Si la réponse aux questions précédentes est oui, quels sont les gains réalisés?

Les tests effectués sur les pièces et les outillages associés des deux familles de tôle de revêtement démontrent clairement que malgré un coût de préparation des modèles de pièces plus élevé (jusqu'à 2.5 fois dans le cas des pièces), les bénéfices à tirer lors de modifications sont très évidents, autant pour la tôle que pour son outillage (gains de plus de 90%). L'emploi de liens technologiques persistants pour développer une approche unifiée pièce-outillage favorise la propagation des changements et amène des économies de temps considérables lorsque la géométrie d'une pièce ou de son contexte est altérée. L'exploitation de ces liens technologiques persistants va cependant de pair avec l'utilisation d'une méthodologie stricte mais adéquate à une gestion cohérente des relations entre les divers éléments en jeu.

La méthodologie présentée utilise le typage fort des entités (la poche et l'ouverture), des notions de savoir-faire spécifique au domaine de l'usinage chimique (les valeurs utilisées pour les copies parallèles des courbes), la notion d'empreinte et de pseudo-empreinte (les contours de la poche et de l'ouverture), et finalement, les liens technologiques persistants. L'emploi commun de ces outils de nouvelle génération a permis de mettre en place une méthodologie unifiée pièce-outillage efficace permettant d'assurer, pour les cas expérimentés, la propagation de changements pouvant être apportés à la géométrie ou au contexte.

Avec CATIA V5, un élément géométrique est lié aux éléments qu'il sert à produire, à cause de liens technologiques persistants. La structure ainsi créée devient plus lourde à gérer, autant par la base de données que par l'utilisateur. Il deviendra donc impératif pour l'utilisateur d'adopter une méthodologie d'identification stricte et rigoureuse des éléments.

En observant les résultats, on peut constater que la réduction de temps obtenue pour la création des gabarits de découpe avec CATIA V5 est très légère ($\pm 10\%$ au décompte global) par rapport au temps requis pour faire un travail semblable avec CATIA V4, avec l'approche méthodologique de l'épaississement. Cependant, des gains appréciables sont immédiatement obtenus lorsqu'une des tôles de revêtement est modifiée. Avec CATIA V4, le changement de la surface du modèle à poche unique complexe impliquerait presque obligatoirement la modélisation complète de son outillage.

On peut donc identifier les contributions directes de ce projet comme étant :

- L'ajout des notions de liens technologiques éphémères et persistants au vocabulaire relié à la conception par caractéristiques;
- La présentation d'une méthodologie V4 offrant des gains moyens de 20% lors de la modélisation des pièces et des gabarits de découpe sous CATIA V4, par rapport à la situation observée en entreprise;
- Une ébauche de méthodologie pouvant être employée pour la conception des tôles et des gabarits de découpe sous CATIA V5;
- Un certain nombre de suggestions pouvant s'intégrer à la mise en œuvre de CATIA V5 ; la gestion des sélections dans les panneaux, par exemple;
- Une confirmation de la nécessité de prévoir des méthodologies intégrant l'exploitation des liens technologiques;
- La proposition d'une méthodologie qui pourra être employée pour la conception d'un outil de création automatique des tôles et des gabarits de découpe sous CATIA V5. Cet outil pourra alors exploiter les concepts

d'application orientée-métier, de typage fort, d'empreinte, de pseudo-empreinte et de liens technologiques persistants.

Le passage de CATIA V4 à CATIA V5 permet de réaliser des gains de productivité de plus de 90% lors des modifications, à condition d'utiliser une méthodologie stricte et rigoureuse liée à l'emploi de liens technologiques persistants, puisque de telles modifications sous CATIA V4 peuvent signifier une nouvelle modélisation complète de la pièce.

On peut finalement conclure en disant qu'il est évident que le premier moyen à venir à l'idée pour augmenter la productivité en modélisation est la programmation d'applications dédiées sous un langage tel VB ou C++, langages s'intégrant très bien à CATIA V5. Toutefois, ce travail a démontré que des gains substantiels sont directement disponibles par le simple emploi de méthodologies de modélisation efficaces et adéquates dédiées à des tâches spécifiques. La validation des concepts faite en milieu industriel lors du second stage a d'ailleurs démontré leur universalité et que des gains intéressants peuvent être obtenus à un coût minime de développement, ce qui cadre tout à fait avec les contraintes du domaine de la conception d'outillage.

ANNEXE 1

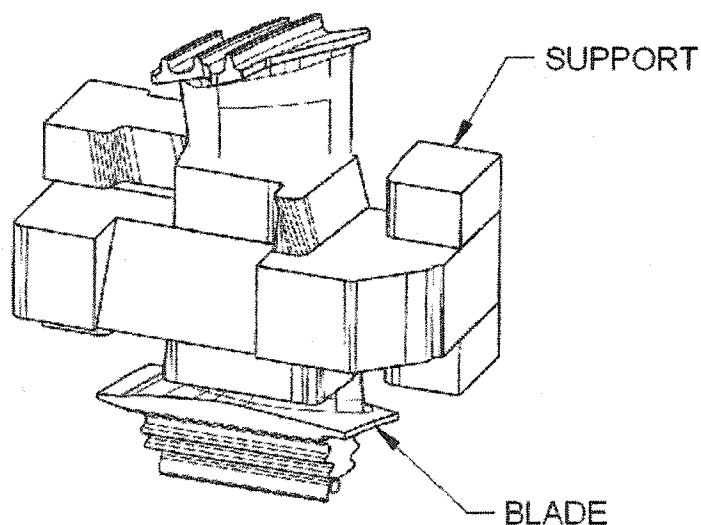
Publication d'éléments pour le positionnement isostatique de pales de turbine

Publication Methodology for Shrouded Blade positioning

The new generation of CAD Packages offers interesting capabilities helping to increase productivity. A proper model structure and usage of publication in CATIA V5 allow immediate time saving in many areas.

The following example shows that time gains superior to 90 % can be achieved in complex part positioning.

Encapsulation dies are used to cast a zinc support on turbine blade for final machining.



Blade and Zinc Support

In such dies, Blade positioning must be done with a maximum overall tolerance of .0015 inch. To achieve such precision, six positioning Pins are required to respect isostatic locations defined by the Engineering department.

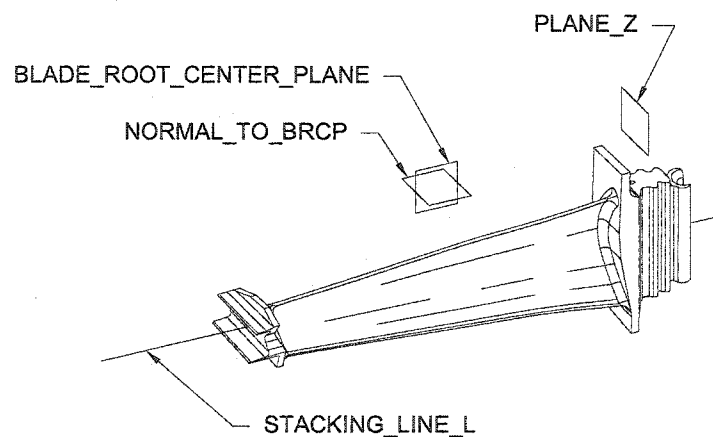
The Pin Positioning task is a long and tedious work that is repeated from die to die and that could be optimized by using an adequate publication methodology that would allow replacing of one Blade by another with a minimum number of designer operations.

Preparation

First, the Blade should be located in the Die, according to the machine specifications such orientation and Sprue hole (melted zinc arrival) location. To perform this location, following geometric entities are required:

- BLADE_ROOT_CENTER_PLANE
- PLANE_Z
- STACKING_LINE_L

For some positioning tasks, another plane, normal to the Blade Root Center Plane, could be used. This plane will be named NORMAL_TO_BRCP.

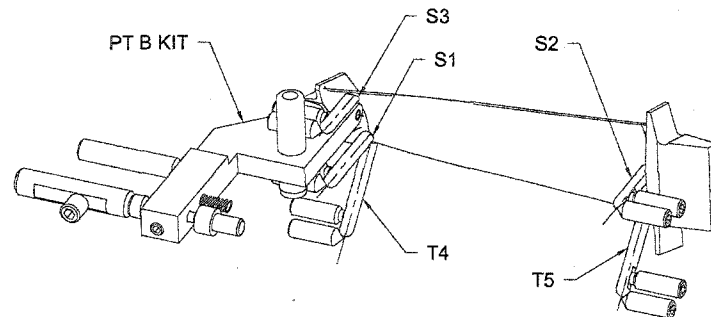


Blade References

A Shrouded Compressor Blade typically uses six reference points:

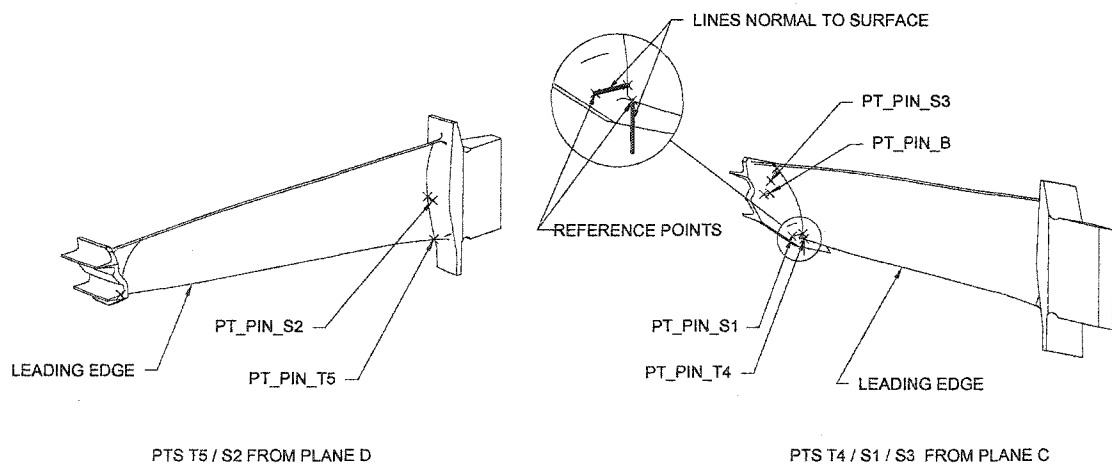
- S1, S2 and S3, used for the First Datum Set;
- T4 and T5, used for the Second Datum Set;
- B, used for the last location.

Shaped pins are used to locate the points. These pins are shown on the following illustration.



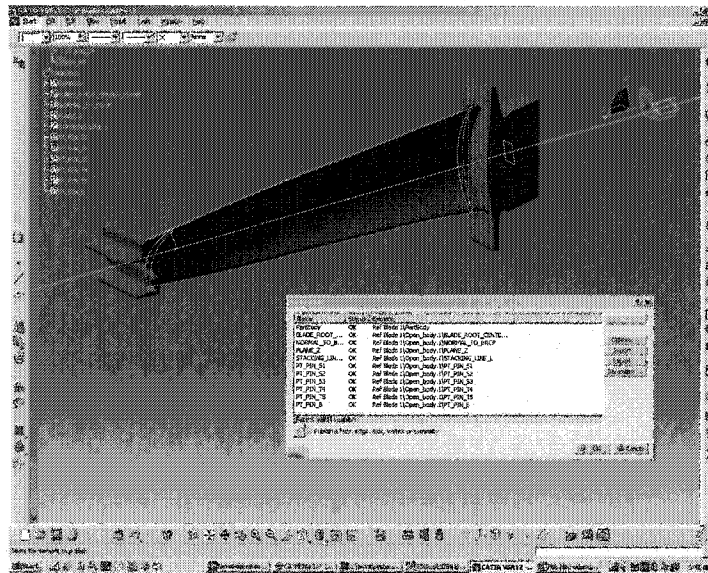
Typical Pin configuration on a Shrouded Blade

In order to make Pin location easier, new points are created on the Blade and on Lines normal to the surfaces, passing through isostatic points. The new points will be located at a distance of the Blade equal to the radius, spherical or cylindrical, machined on the appropriated pin. Points used for positioning are shown on the following illustration.

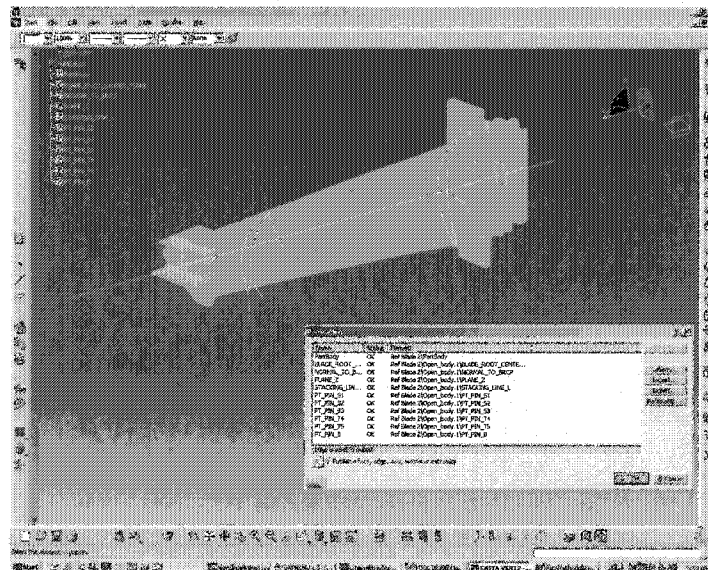


Actual Isostatic references on a Shrouded Blade

The following illustrations show two blades prepared for interchangeability. In both models, three planes, one line and six points were published in addition to the PartBody.



Published reference elements in Ref Blade 1

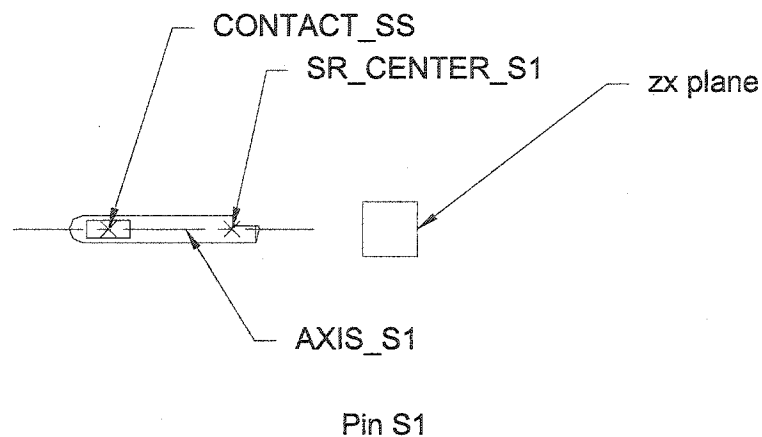


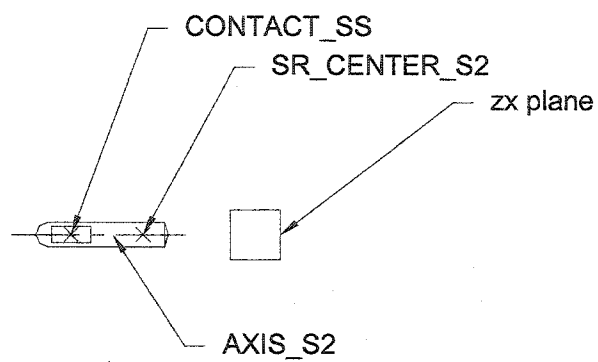
Published reference elements in Ref Blade 2

Publication is an interesting linking mechanism allowing the replacement of a part by another in an assembly, with a minimum impact and no constraints re-linking. It is however important to note that Publication requires a very strict naming of the published elements in order to allow the software to retrieve these elements when parts are replaced in a given product. The order in which elements are selected for Publication should not have any impact in the way the replacement is done. However, for clarity and ease of use, similar element selection sequences should be followed.

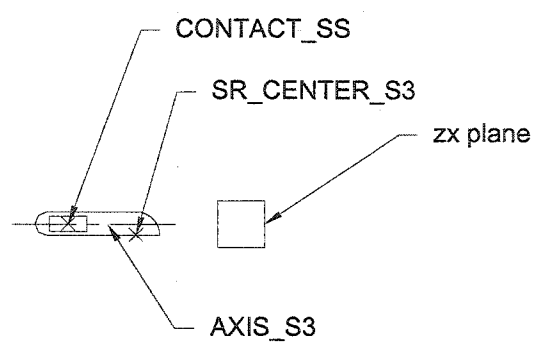
In order to contact the Blade isostatic reference points, locating pins are shaped with spherical or cylindrical radius. Due to the complex Blade geometry, the six required Pins are not identical.

Typically, Pins are shaped as shown on the following illustrations. On S1, S2, S3 and B pins, centers of spherical radius are shown and will be used for pin positioning. On T4 and T5 pins, a reference point is created on the surface. Axis and ZX plane are shown and published in each Pin part in order to allow adequate positioning. Notice that pins S1 and B could have to be notched in order to allow enough room for the Blade or for another pin in a crowded environment. Finally, to facilitate the location of the Set screws required for Pin retention and adjustment, one more point named Contact SS is added and published in each Pin part.

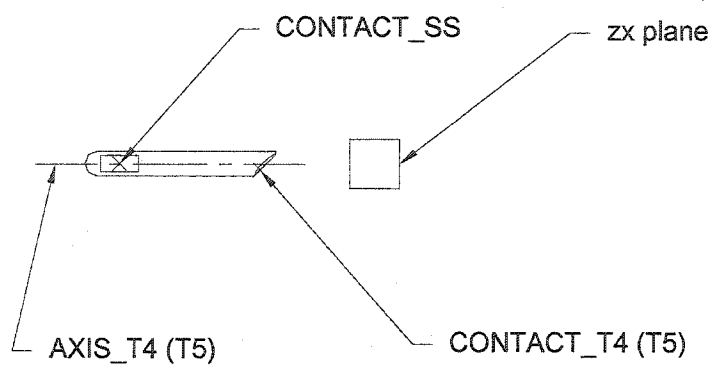




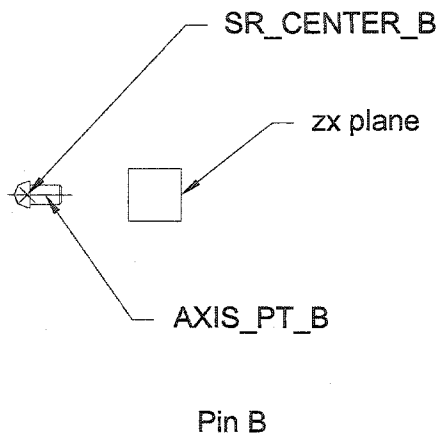
Pin S2



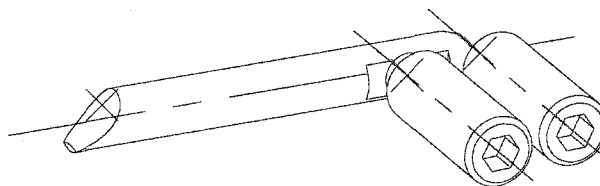
Pin S3



Pin T4 / T5



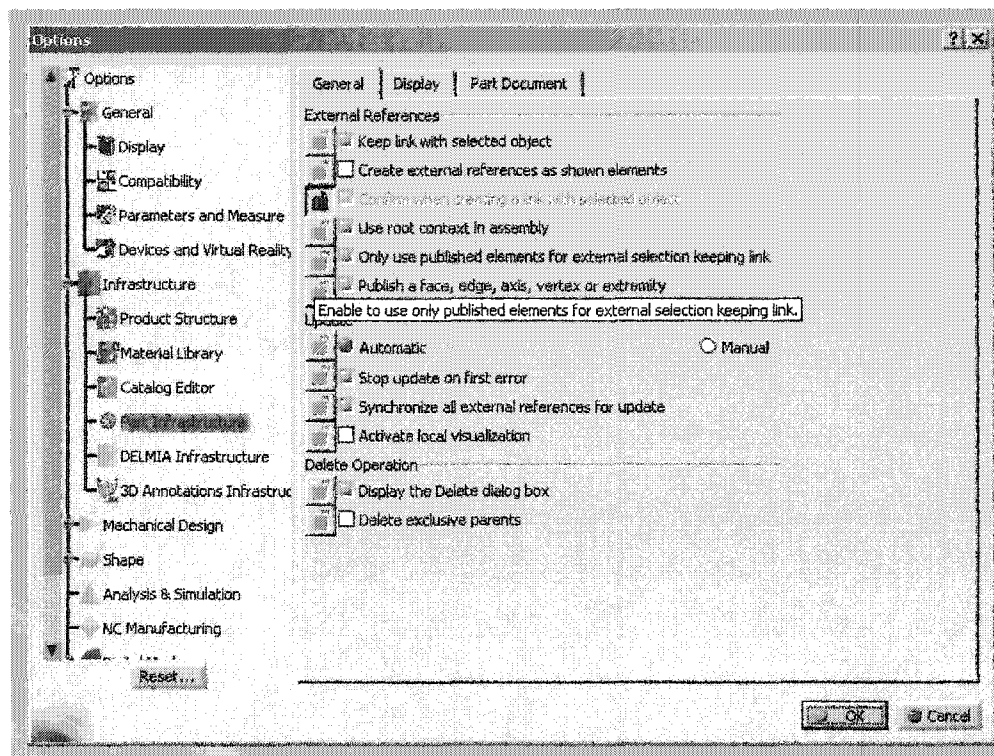
Pins will be maintained in place by a standard set screw and a conical point adjustment set screw. A typical set screw configuration is shown on the following illustration.



Set screw configuration

Option Setting

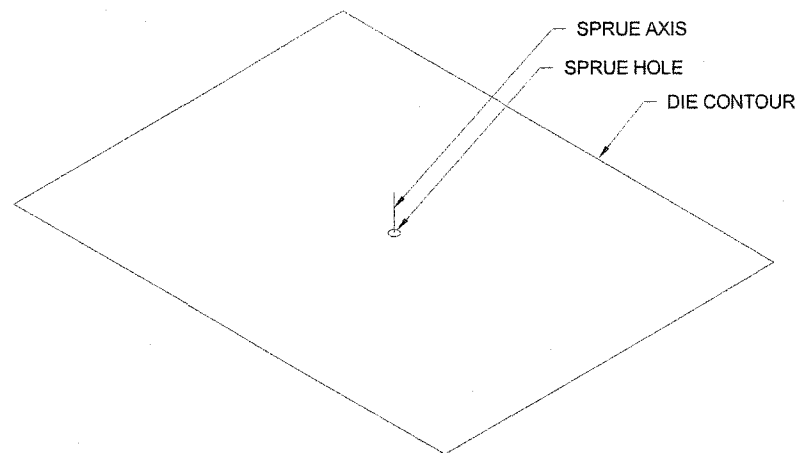
In order to link the Pins to the Blade and keep that link active, some options have to be selected in the Part Infrastructure dialog box. In this test a supplementary option was selected in order to make sure that only published elements would be selected.



Publication settings

Setting Constraints

Pin alignment is based on the Machine Skeleton geometry to facilitate access and part machining. The Skeleton contains Machine geometry that will be used to position different elements of the die according to specific reference locations. This Skeleton is shown on the following illustration.



Machine Skeleton

For S(X) and B Pins, parallelism constraints are used to align the axis and the flat side to Die. Coincidence constraints are used to Centers of the spherical radius shapes to the reference points published on the blade. For T Pins, Contact points on the pins are directly connected to the Blade leading edge reference points.

Warning

It is important to note that in some cases, conflicts in assembly constraints led to constraining crashed that impacted the Publication definition. For example, in a specific part a specific published line was pointing to a plane or two different published elements were pointing to the same geometric element. Publication could then ask for regular checking in order to assure integrity.

Conclusion

An adequate Methodology and the use of Publication in CATIA V5 offers time gains superior to 90 % with a very small model preparation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lamarche, B., & Michaud, M. (2003). *Stage en entreprise - L'usage de la CAO reliée à l'usinage chimique chez Bombardier aéronautique*. Montréal: École de technologie supérieure.
- [2] Harris, W. T. (1976). *Chemical milling: the technology of cutting materials by etching*. Oxford: Clarendon Press.
- [3] Soors, P. (1984). *Dessin d'outillage en aéronautique*. Outremont: Modulo Éditeur.
- [4] CARR-LANE. (2004). *FOUR-SIDED TOOLING BLOCKS*, from <http://www.carriane.com/Catalog/index.cfm/27825071F0B221118070C1C513E111D081B0006280B1713050245221E0107070F1A3C3B28535B4155>
- [5] Dassault Systems. (2004). *Products & Solutions / CATIA*, from <http://plm.3ds.com/10+M52c1d207f79.0.html>
- [6] Autodesk. (2004). *Autodesk*, from <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/home?siteID=123112&id=129446>
- [7] Vistagy. (2004). *FiberSIM : Product Info*, from <http://www.vistagy.com/products/fibersim.htm>
- [8] Moldflow. (2004). *Moldflow Plastics Advisers*, from <http://www.moldflow.com/products/MPA/>
- [9] Computervision. (2004). *Computervision*, from <http://www.pdmic.com/cv/>
- [10] UGS. (2004). *UGS The PLM Company*, from <http://www.ugs.com/products/nx/>
- [11] Giguère, F. (2002). *Application des liens multi-modèles à la conception mécanique*. Unpublished Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- [12] McMahon, C., & Browne, J. (1998). *CADCAM. Principles, practice and manufacturing management* (2nd ed.). Harlow, England: Addison-Wesley.
- [13] Shah, J. J. (1991). Assessment of features technology. *Computer Aided Design*, 23(5), 331-343.
- [14] Shah, J. J., & Mäntylä, M. (1995). *Parametric and feature-based CAD/CAM. Concepts, Techniques and Applications*. New-York, NY: John Wiley and Sons, Inc.
- [15] Hummel, K. E., & Brooks, S. L. (1989). *Symbolic representation of manufacturing features for an automated process planning system*. Paper presented at the ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA.
- [16] Bidarra, R., & Bronsvort, W. F. (2000). Semantic feature modelling. *CAD Computer Aided Design*, 32(3), 201-225.
- [17] Gao, S., & Shah, J. J. (1998). Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph. *Computer-Aided Design*, 30(9), 727-739.
- [18] Ozturk, F., Kaya, N., Alankus, O. B., & Sevinc, S. (1996). Machining features and algorithms for set-up planning and fixture design. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 9(4), 207-216.
- [19] Mantyla, M., Lagus, K., & Laakko, T. (1994). Application of constraint propagation in part family modelling. *CIRP Annals*, 43(1), 129-132.
- [20] Jha, K., & Gurumoorthy, B. (2000). Automatic propagation of feature modification across domains. *CAD Computer Aided Design*, 32(12), 691-706.

- [21] Chou, Y.-C. (1990). *Methodology for automatic layout of fixture elements based on machining forces considerations*. Paper presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Nov 25-30 1990, Dallas, TX, USA.
- [22] Rong, Y., Bai, Y., Zhu, Y., & Luo, Z.-B. (1995). *Computer-automated fixture configuration design*. Paper presented at the Int. Conference on Intelligent Manufacturing, Jun 10 1995, Wuhan, China.
- [23] Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1992). Tooling design accommodating springback errors. *Journal of Materials Processing Technology. Proceedings of the 2nd International Conference on Material Processing Defects*, Jul 1-3 1992, 32(1-2), 499-508.
- [24] Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1992). Tooling design in sheet metal forming using springback calculations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 34(2), 113-131.
- [25] Markus, A., Ruttkay, Z., & Vancza, J. (1990). Automating fixture design. From imitating practice to understanding principles. *Computers in Industry*, 14(1-3), 99-108.
- [26] Subrahmanyam, S. R. (2002). Fixturing features selection in feature-based systems. *Computers in Industry*, 48(2), 99-108.
- [27] Kumar, A. S., Subramaniam, V., & Seow, K. C. (1999). Conceptual design of fixtures using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(2), 79-84.
- [28] Perremans, P. (1996). Feature-based description of modular fixturing elements: the key to an expert system for the automatic design of the physical fixture. *Advances in Engineering Software*, 25(1), 19-27.
- [29] Kakish, J., Zhang, P.-L., & Zeid, I. (2000). Towards the design and development of a knowledge-based universal modular jigs and fixtures system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(4), 381-401.
- [30] Wu, Y., Rong, Y., & Chu, T. C. (1997). Automated generation of dedicated fixture design. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 10(3-4), 213-235.
- [31] Cecil, J. (2001). Computer-aided fixture design - A review and future trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(11), 790-793.
- [32] Hargrove, S. K., & Kusiak, A. (1994). Computer-aided fixture design: a review. *International Journal of Production Research*, 32(4), 733-753.
- [33] Penoyer, J. A., Burnett, G., Fawcett, D. J., & Liou, S.-Y. (2000). Knowledge based product life cycle systems: Principles of integration of KBE and C3P. *CAD Computer Aided Design*, 32(5-6), 311-320.
- [34] Park, S. C. (2003). Knowledge capturing methodology in process planning. *CAD Computer Aided Design*, 35(12), 1109-1117.
- [35] Nielsen, E. H., Dixon, J. R., & Zinsmeister, G. E. (1991). *Capturing and using designer intent in a design-with-features system*. Paper presented at the 3rd International Conference on Design Theory and Methodology presented at the 1991 ASME Design Technical Conferences, Sep 22-25 1991, Miami, FL, USA.
- [36] Giguère, F., Rivest, L., & Desrochers, A. (2003). Improving Design Productivity and Product Data Consistency. In R. Soenen & G. J. Olling (Eds.), *Feature Based Life-Cycle Modelling* (pp. 77-91). Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.

- [37] Giguère, F., Rivest, L., Desrochers, A., & Maranzana, R. (2002). Les caractéristiques contextuelles : une solution pour accroître la productivité en CAO. *Revue de CFAO et d'informatique graphique - De la CAO géométrique vers une CAO fonctionnelle. Spécial CFAO au Québec.*, 17, 106-122.
- [38] Macabies, L., Desrochers, A., Rivest, L., & Maranzana, R. (2000, May 16-19). *Liens multi-modèles en CAO - Application au rivetage en aéronautique*. Paper presented at the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME 2000), Montreal (Quebec).
- [39] Msaaf, O. (2002). *Validation des caractéristiques d'usinage par des grammaires d'usinage attribuées. Une contribution à la prise en compte des contraintes d'usinage en cours de conception*. Unpublished Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal.
- [40] Dassault_Systems. (2003). Kwr - Adding Parameters.
- [41] Dassault_Systems. (2003). Kwr - Powercopy.
- [42] Dassault_Systems. (2003). Kwr - Rules.
- [43] Dassault_Systems. (2003). Kwr - Laws.
- [44] Dassault_Systems. (2003). Kwr - Importing Parameters.
- [45] Dassault_Systems. (2003). *Kwr - Publication*, from D:\Program Files\Dassault Systemes\B12doc\English\online\CATIAfr_C2\kwrugCATIAfrs.htm

